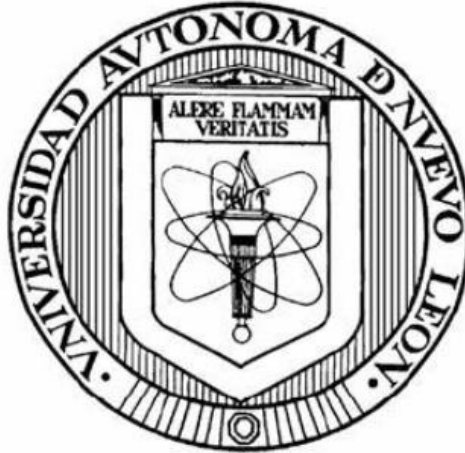


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**“PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS Y SEMI-DESTRUCTIVAS PARA LA
VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO
EN EL LUGAR”**

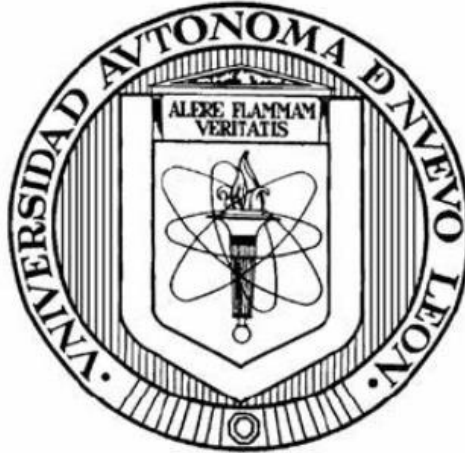
POR

ING. JOSÉ GUADALUPE MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

NOVIEMBRE, 2018

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**“PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS Y SEMI-DESTRUCTIVAS PARA LA
VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO
EN EL LUGAR”**

POR

ING. JOSÉ GUADALUPE MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
UANL**

**CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. ISMAEL FLORES VIVIAN
UANL**

NOVIEMBRE, 2018



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

Subdirector de estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Civil, UANL

Presente:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de la tesis con título **"Pruebas no-destructivas y semi-destructivas para la verificación de la resistencia a la compresión del concreto en el lugar"**, que presenta el **ING. JOSÉ GUADALUPE MARTÍNEZ HERNÁNDEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el martes 4 de diciembre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente,

"Alere Flammam Veritatis"

Cd. Universitaria, 12 de octubre de 2018

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

Asesor





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA I Programa de Ingeniería Civil

Laboratorio de Resistencia de Materiales y Mecánica de Suelos



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

P R E S E N T E:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título **"Pruebas no-destructivas y semi-destructivas para la verificación de la resistencia a la compresión del concreto en el lugar"**, que presenta el **ING. JOSÉ GUADALUPE MARTÍNEZ HERNÁNDEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictaminó que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el martes 4 de diciembre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

Dr. Jose Antonio Rodríguez Rodríguez
Encargado del Laboratorio y Docente Investigador.

c.c.p. Archivo.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL
DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título **"Pruebas no-destructivas y semi-destructivas para la verificación de la resistencia a la compresión del concreto en el lugar"**, que presenta el **ING. JOSÉ GUADALUPE MARTÍNEZ HERNÁNDEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el martes 4 de diciembre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 12 de octubre de 2018.

Ismael Flores Vivian

Dr. Ismael Flores Vivian

**Coordinador del Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción
Evaluador**



*"Educación de clase mundial,
un compromiso social"*

Código: FOR-SEP-01; Revisión: 01

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels.: (81) 1442 4400 ext. 4447 y 4448, 6329 4000 ext. 7216 y 7234
<http://www.fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx

PRUEBAS NO-DESTRUCTIVAS Y SEMI-DESTRUCTIVAS
PARA LA VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA
COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN EL LUGAR.

Aprobación de la tesis:

Asesor de la tesis

Co-Asesor de la tesis

Subdirector de Estudios de Posgrado

AGRADECIMIENTOS

José Guadalupe Martínez Hernández

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por abrirme sus puertas y cobijarme durante esa etapa tan importante de mi vida, por ser parte de mi formación académica y profesional.

A los profesores catedráticos que contribuyeron con su enseñanza para seguir creciendo profesionalmente.

Al Dr. Alejandro Durán Herrera por sus apoyo, confianza, consejos y motivación en seguir preparándome, además de compartirme sus conocimientos y experiencias y por apoyarme incondicionalmente en el proyecto de investigación durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería civil de la UANL.

A mis amigos y compañeros de generación José Valdez Aguilar, Aldrhyn Esquivel Gómez, Gregorio Castruita Velázquez y Jorge Luis Herrera de Casas que siempre estuvieron conmigo en todos los momentos malos y buenos, por compartir alegrías, risas, viajes y experiencias, por su comprensión y atenciones brindadas dentro del aula como fuera de ella.

A los ahora ingenieros Amauri Illamas, Karla Hernández y Carlos por haberme apoyado con mi experimentación durante su estancia en el verano de la ciencia.

A mi tío Ismael Hernández Narváez que me brindó su apoyo incondicional y me orientó a cumplir mis metas.

A todos mis primos por su cariño, confianza y experiencias pasadas, por las alegrías y momentos vividos.

A mis tíos por su apoyo, confianza y cariño.

A mis abuelos por su amor y cariño incondicional, por darme el ejemplo de superación y perseverancia, además por ser mi ejemplo a seguir y por ser de las personas más importantes en mi vida.

A mi hermano y a su esposa Perla por todo el cariño brindado, por los mejores momentos que me regalaron de risas, alegrías y aliento, por su apoyo incondicional y por ser parte de mi motivación y alegría, por ser un buen ejemplo y cuidar de mí.

A la familia Medrano Magadan que me abrió las puertas de su casa y me dieron la confianza y apoyo en los momentos en que lo más necesité.

En especial a mi tía Ebigail Aranda Velázquez[†] que siempre estuviste sumamente orgulloso de mi y de mi hermano.... Siempre te recordaremos!!!!

ESPECIALMENTE A DIOS Y A MI FAMILIA

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios y a mi familia

A Dios por darme la vida, por siempre estar conmigo en cada etapa importante, por escucharme y darme la fuerza para salir adelante, por estar conmigo en los momentos complicados de mi vida y guiar mis pasos cada momento, por haberme dado la bendición de tener los mejores padres; hermano y la mejor familia, por poner personas importantes en mi vida y por haberme permitido lograr esta meta tan importante.

A mis padres por ser la mayor inspiración, por ser el motor que guía mis pasos en la vida, por ser una familia tan ejemplar, comprometida y responsable, por llevarme hacia el buen camino de la formación de mi carrera, por confiar en mí haciéndome sentir protegido y respaldado todo momento, porque siempre estuvieron a mi lado cuando físicamente me encontraba solo, por ser el motivo de mi crecimiento y motivación profesional y por enseñarme el significado de lo que se le llama honestidad y responsabilidad.

A mi esposa Fernanda por haberme dado el regalo más preciado de la vida y por ser mi empuje e inspiración cada mañana, por confiar en mí y darme la motivación día con día y haber estado conmigo en los momentos más difíciles e importantes de mi vida, por reglarme este hogar junto con Fátima, Alejandro y Josecito y por ser parte el motivo de mi crecimiento profesional y personal.

Papá: J. Guadalupe Martínez Velázquez

Mamá: Guillermina Hernández Narváez

Hermano: Juan Francisco Martínez Hernández

Esposa: Lorena Fernanda Medrano Magadan

GRACIAS...!! LOS AMO MUCHO...!!

Con mucho cariño; su hijo, hermano y esposo:

Ing. José Guadalupe Martínez Hernández.

Contenido

RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	4
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.2. HIPÓTESIS	7
1.3. OBJETIVOS.....	7
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	7
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	8
1.4. JUSTIFICACIÓN	9
2. ANTECEDENTES	12
2.1. ENSAYO DE EXTRACCIÓN (PULL-OUT)	12
2.1.1. <i>Mecanismos de falla de la prueba de extracción (Pull-Out)</i>	16
2.1.1.1. Pruebas a gran escala	17
2.1.2. <i>Análisis de Micro Agrietamiento</i>	22
2.1.3. <i>Variabilidad de la prueba de extracción (Pull-Out)</i>	25
2.1.4. <i>Relación de resistencia</i>	29
2.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS NÚCLEOS.....	41
2.3. MÉTODO DE MADUREZ.....	43
2.3.1. <i>Antecedentes del método de madurez</i>	43
3. ESTADO DEL ARTE.....	50
3.1. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN EL LUGAR 50	
3.1.1. <i>Métodos de pruebas no destructivas</i>	51
3.1.2. <i>Métodos de dureza superficial</i>	51
3.1.2.1. Método de rebote	52
3.1.2.1.1. <i>Limitaciones</i>	54
3.1.3. <i>Métodos de resistencia a la penetración</i>	55
3.1.3.1. Sonda de Windsor.....	55
3.2. ENSAYOS DE EXTRACCIÓN (PULL-OUT)	57
3.2.1. <i>Principio del funcionamiento de la prueba</i>	59
3.2.2. <i>Aplicación de la prueba de extracción (Pull-Outt)</i>	61
3.2.3. <i>Evaluación de estructuras nuevas</i>	63
3.2.4. <i>Características estadísticas</i>	64
3.3. DESARROLLO DEL MÉTODO DE MADUREZ	65
3.3.1. <i>Introducción</i>	65

3.3.2.	<i>Definición del método</i>	67
3.3.3.	<i>Función de madurez Nurse-Saul</i>	70
3.3.3.1.	Valores típicos de temperatura de referencia (T_0).....	72
3.3.4.	<i>Función de madurez de Arrhenius</i>	73
3.3.4.1.	Valores típicos de energía de activación (E_a).....	76
3.3.5.	<i>Limitaciones del método de madurez</i>	78
3.3.6.	<i>Funciones para modelar la relación de resistencia-madurez</i>	78
4.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.	80
4.1.	ETAPA I. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	81
4.2.	ETAPA II. DISEÑO DE MEZCLAS DE REFERENCIA	86
4.2.1.	<i>Pruebas para concreto fresco y endurecido</i>	86
4.2.1.1.	Revenimiento	87
4.2.1.2.	Contenido de aire.....	88
4.2.1.3.	Masa unitaria.....	88
4.2.1.4.	Resistencia a la compresión	89
4.3.	ETAPA III. ELABORACIÓN DE PRISMAS DE CONCRETO Y ENSAYOS A COMPRESIÓN EN NÚCLEOS.	91
4.3.1.	<i>Preparación de los prismas para la prueba de extracción “Pull-Out” LOK-TEST y extracción de núcleos.</i>	91
4.3.2.	<i>Ensayos a compresión de los núcleos extraídos de los prismas I y II</i>	95
4.3.3.	<i>Ensayo de extracción (Pull-Out) “LOK-TEST”</i>	98
4.4.	ETAPA IV.- DESARROLLO DEL MÉTODO DE MADUREZ	100
4.4.1.	Instalación del sensor de temperatura	102
4.5.	ETAPA V.- ENERGÍA DE ACTIVACIÓN E_a Y DATO DE TEMPERATURA T_0	104
4.5.1.	<i>Tiempos de fraguado</i>	106
4.5.2.	<i>Resistencia a la compresión del mortero equivalente</i>	108
4.5.3.	<i>Curado de los cubos de mortero equivalente</i>	109
4.5.4.	<i>Ensayo de los cubos de mortero equivalente</i>	111
4.6.	ETAPA VI.- CORRELACIONES.....	111
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	114
5.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	114
5.1.1.	<i>Agregados</i>	114
5.1.2.	<i>Cemento</i>	114
5.1.4.	<i>Aditivo</i>	115
5.2.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.	116
5.2.1.	<i>Diseño de mezclas de referencia.</i>	116
5.2.2.	<i>Resistencia a la compresión</i>	117

5.2.3.	<i>Correlaciones de Núcleos de 2 in (4.5 cm) y 3 in (6.9 cm) VS cilindros 10 x 20 cm</i>	
	123	
5.2.4.	<i>Correlaciones de cilindros de 10 x 20 cm, Núcleos de 2 in (4.5 cm) y 3 in (6.9 cm) VS Prueba de extracción (Pull-Out)</i>	126
5.2.5.	<i>Comparación de modelos de correlación con los resultados encontrados en la investigación</i>	130
5.3.	RESULTADOS DEL MÉTODO DE MADUREZ	134
5.3.1.	<i>Tiempos de fraguado del concreto</i>	134
5.3.1.1.	Resistencia a compresión en cubos de mortero equivalente	139
5.3.1.2.	Registro de historial de temperaturas internas del concreto	144
5.3.2.	<i>Determinación de la energía de activación y la temperatura de referencia</i>	147
5.3.3.	<i>Predicciones de la resistencia a la compresión con las funciones de madurez</i>	149
5.3.3.1.	Resultados de la Función de madurez (Nurse-Saúl)	149
5.3.3.2.	Resultados de edad equivalente basados en la ecuación de Arrhenius	155
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	160
	BIBLIOGRAFÍA	169
	ANEXOS	176

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Equipo de extracción en operación.....	12
Figura 2. Esquema de la sección transversal del ensayo de extracción (Pull-Out) colado en obra	13
Figura 3. Esquema del inserto propuesto por Kieckegaard-Hansen.....	15
Figura 4. Secuencia de falla basada en pruebas de extracción a gran escala [9].	18
Figura 5. Modelo para mostrar el mecanismo del entrelace del agregado durante la prueba de extracción.....	20
Figura 6. Desplazamiento del cabezal de inserción (mm)	22
Figura 7. Mecanismo de falla de las pruebas de extracción según Krenchel y Bickley [12].....	23
Figura 8. Repetibilidad de la prueba de extracción para diferentes tipos de agregados en el estudio de Stone, Carino y Reeve.....	26
Figura 9. Coeficiente de variación en función de: (A) ángulo del vértice, (B) profundidad de empotramiento, (C) tamaño máximo de agregado y (D) tipo de agregado.....	28
Figura 10. Relaciones de resistencia para el concreto elaborado con piedra caliza triturada: A) Curva en función potencial y B) función lineal para diferentes rangos de resistencia [23]......	33

Figura 11. Relaciones de resistencia para el concreto elaborado con agregado de río: A) relación de la función potencial, B) Relación de la función lineal para diferentes rangos de resistencias [23].	35
Figura 12. A) Relación de resistencia bilineal propuesta para el sistema LOK-TEST. B) Aproximación de la función de potencia de las dos líneas [24].	37
Figura 13. Datos de correlación y mejor ajuste de las relaciones de las funciones lineal y potencial [25].	39
Figura 14. Ensaye de un núcleo de concreto en ejecución.....	42
Figura 15. Esquema ilustrativo del funcionamiento del martillo de rebote.	52
Figura 16. Equipo de sonda de Windsor en operación.	56
Figura 17. Ilustración de la penetración de la sonda en el concreto.	57
Figura 18. Tipos de insertos: A) Inserto flotante y B) inserto para cimbra.	58
Figura 19. Equipo de extracción empleado.....	59
Figura 20. Esquema del principio del funcionamiento de la prueba LOK-TEST.	60
Figura 21. Falla cónica resultante de la prueba LOK-TEST.....	61
Figura 22. Molde para obtener las correlaciones de acuerdo al ACI 228.	63
Figura 23. A) Inserto colocado directamente en la cimbra, B) Inserto flotante de descimbrado temprano.	64
Figura 24.Efecto de los historiales de temperatura en el cálculo de la madurez.	69
Figura 25. Esquema del historial de temperatura y factor temperatura-tiempo estimado de acuerdo con la Ecuación 16.	71

Figura 26. Esquema que muestra el comportamiento de la ecuación de arrhenius.	75
Figura 27. El "efecto cruzado" debido a la diferente temperatura del concreto a edad temprana durante el desarrollo de la relación de resistencia-madurez....	76
Figura 28. determinación de la densidad y absorción de los agregados ASTM C127 y ASTM C 128	82
figura 29. Obtención del PVVS y PVSS con ASTM C 29/C 29M	83
Figura 30 Análisis granulométrico de agregado fino y grueso ASTM C136.....	83
Figura 31. Prueba de fluorescencia de rayos X en proceso	84
Figura 32. Determinación del contenido de líquidos en el aditivo.	85
Figura 33. Diseño de mezclas.....	87
Figura 34. Caracterización de mezcla de referencia.....	89
Figura 35. Ensayo de resistencia a la compresión del concreto realizado en cilindros de 10 X 20 cm.....	90
Figura 36. Diseño experimental para la elaboración de los prismas de concreto	91
Figura 37. Molde preparado con insertos previos al vaciado	92
Figura 38. Prisma III vaciado con insertos flotantes incluidos en la cara superior del molde	93
Figura 39. Prisma I y II (solamente para extracción de núcleos)	94
Figura 40. Ejecución de la extracción de núcleos a las edades especificadas .	94
Figura 41. prisma III (solamente para la prueba LOK-TEST).....	95
Figura 42. Muestra de núcleos para ensayo a una edad especificada	96
Figura 43. Recapeo y nivelación de núcleos previo al ensayo	96

Figura 44. Ensayo a compresión de un núcleo extraído	97
Figura 45. Prismas de concreto conservados encuarto de curado	98
Figura 46. Ejecución de la prueba LOK-TEST	99
Figura 47. Testigos resultantes de la prueba LOK-TEST	100
Figura 48. Desarrollo del método de madurez	101
Figura 49. Descripción del método de madurez	102
Figura 50. Sensor de temperatura Command Center	103
Figura 51. Sensores instalados en el prisma de concreto	104
Figura 52. Procedimientos para determinar E_a y T_0	106
Figura 53. Obtención de la muestra tamizada por la malla No. 4	107
Figura 54. A) Penetración de las muestras extraídas de las cámaras de temperatura, B) Muestras expuestas en cámara a 40°C, C) Muestras expuestas en laboratorio a 23°C, D) Muestras expuestas en cámara de refrigeración a 10°C.	108
Figura 55. Paquete de cubos para una mezcla específica	109
Figura 56. Curado de especímenes a las temperaturas correspondientes.	110
Figura 57. Ensayos de cubos de mortero	111
Figura 58. Etapa VI.- Correlaciones de los métodos empleados.	112
Figura 59. Comparación de la resistencia a compresión de los cilindros vs núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) de la mezcla M1	120
Figura 60. Comparación de la resistencia a compresión de los cilindros vs núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) de la mezcla M2	120
Figura 61. Comparación de la resistencia a compresión de los cilindros vs núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) de la mezcla M3	121

Figura 62. Comparación de la resistencia a compresión de los cilindros vs núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) de la mezcla M4	121
Figura 63. Comparación de la resistencia a compresión de los cilindros vs núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) de la mezcla M5	122
Figura 64. Correlación de resistencia a compresión obtenida de cilindros de 10 x 20 cm vs núcleos de 2 in (4.5 cm)	124
Figura 65. Correlación de resistencia a compresión obtenida de cilindros de 10 x 20 cm vs núcleos de 3 in (6.9 cm)	125
Figura 66. Correlación de resistencia obtenida de cilindros de núcleos de 3 in (6.9cm) vs núcleos de 2 in (4.5cm)	125
Figura 67. Correlación de resistencia a compresión obtenida de cilindros de 10 x 20 cm vs fuerza de extracción (Pull-Out)	127
Figura 68. Correlación de la resistencia a compresión obtenida de núcleos de 2 in (4.5 cm) vs fuerza de extracción (Pull-Out)	128
Figura 69. Correlación de la resistencia a compresión obtenida de núcleos de 3 in (6.9 cm) vs fuerza de extracción	129
Figura 70. Tiempos de fraguado final M1	136
Figura 71. Tiempos de fraguado final M2	136
Figura 72. Tiempos de fraguado final M3.	137
Figura 73. Tiempos de fraguado final M4	137
Figura 74. Tiempos de fraguado final M5	138
Figura 75. Efecto del curado a tres temperaturas (10, 23 y 49°C) M1	141
Figura 76. Efecto del curado a tres temperaturas (10, 23 y 49°C) M2	141
Figura 77. Efecto del curado a tres temperaturas (10, 23 y 49°C) M3.	142

Figura 78. Efecto del curado a tres temperaturas (10, 23 y 49°C) M4.....	142
Figura 79. Efecto del curado a tres temperaturas (10, 23 y 49°C) M5.....	143
Figura 80. Monitoreo del historial de temperaturas de los moldes de concreto de 20 x 20 x 60 cm M1.....	144
Figura 81. Monitoreo del historial de temperaturas de los moldes de concreto de 20 x 20 x 60 cm M2.....	145
Figura 82. Monitoreo del historial de temperaturas de los moldes de concreto de 20 x 20 x 60 cm M3.....	145
Figura 83. Monitoreo del historial de temperaturas de los moldes de concreto de 20 x 20 x 60 cm M4.....	146
Figura 84. Monitoreo del historial de temperaturas de los moldes de concreto de 20 x 20 x 60 cm M5.....	146
Figura 85. Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M1	150
Figura 86. Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M2	151
Figura 87. Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M3	152
Figura 88. Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M4	153
Figura 89. Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M5	154
Figura 90. Resistencia obtenida a partir de la edad equivalente te M1.....	155
Figura 91. Resistencia obtenida a partir de la edad equivalente te M2.....	156
Figura 92. Resistencia obtenida a partir de la edad equivalente te M3.....	156
Figura 93. Resistencia obtenida a partir de la edad equivalente te M4.....	157
Figura 94. Resistencia obtenida a partir de la edad equivalente te M5.....	157

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen del coeficiente de variación dentro de la prueba de extracción [17].....	27
Tabla 2. Relaciones de Resistencia lineal de Bickley (Bickley, The variability of pullout tests and in-place concrete strength, 1982) con el sistema LOK-TEST ($P = a + bC$).....	32
Tabla 3. Valores de temperatura de referencia propuestos por Carino y Tank [61].	73
Tabla 4. Valores de energía activación propuestas por Carino y Tank [61].....	77
Tabla 5. Etapa I.- Propiedades determinadas para la caracterización de los materiales	81
Tabla 6. Propiedades físicas de los agregados	114
Tabla 7. Composición química del cemento CPO 40.....	115
Tabla 8. Densidad, % de contenido de sólidos y % de contenido de líquidos	116
Tabla 9. Caracterización de los diseños de mezclas de referencia	116
Tabla 10. Resistencia a la compresión y desviación estándar de las mezclas de referencia comparada con la resistencia y desviación estándar de los núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) y con la fuerza de extracción obtenida por el sistema LOK-TEST.....	118
Tabla 11. Tiempos de fraguado inicial y final de las mezclas en estudio	135
Tabla 12. Resistencia a la compresión de los cubos de mortero equivalente curados a 10, 23 y 40°C.	139

Tabla 13. Valores de k_i y k_f para aplicar la constante de crecimiento.....	148
Tabla 14.Resultados de la temperatura dato (T_o) y energía de activación (E_a) para las 5 mezclas de referencia	149

CAPITULO 1

RESUMEN

Actualmente la industria de la construcción se ha encargado de mejorar y adoptar técnicas que le permitan evaluar los sistemas constructivos con un mayor grado de rapidez que mejore y acelere las actividades críticas que suceden en todos los procesos de construcción tales como el descimbrado, el postensado y apertura al tráfico a usuarios que generalmente el parámetro que utilizan para tomar decisiones es el ensayo a compresión de cilindros realizados y curados de manera estándar que no representan las condiciones reales en las que está sometida la estructura. Es por eso por lo que se ha optado por implementar métodos que nos dictaminen tal parámetro sin generar un daño que pueda poner en riesgo la integridad de la estructura de una manera más rápida, eficiente y sobre todo confiable.

Mencionado lo anterior, en la presente investigación se analizarán pruebas que determinen un parámetro de la resistencia a la compresión del concreto. Estas pruebas están destacadas dentro del rubro de las pruebas como: no destructivas y semidestructivas debido a que no le generan daño a una estructura y son unos de los métodos más importantes que nos brindan una solución y alternativa optima de obtener este parámetro. Para este trabajo de investigación se probaron cinco proporcionamientos a las edades de 3,7,14,21 y 28 días, estos diseños comprenden las resistencias desde 200 kg/cm² hasta los 500 kg/cm², en el que

las pruebas utilizadas para determinar la resistencia fueron a través de ensayos realizados a núcleos de concreto de 2 y 3 in extraídos de un molde de 20 x 20 x 60 cm, al mismo tiempo, se ejecutaron pruebas de extracción por un método de Pull-Out que lleva por nombre comercial LOK-TEST; este método nos permitió establecer correlaciones en las que los resultados encontrados demuestran que es una buena alternativa, técnica y económicamente viable para conocer este parámetro de manera confiable.

Por otra parte, se aplicó el método de madurez a todas las mezclas en estudio y para cada mezcla se determinó el valor de referencia T_0 y la energía de activación E_a para establecer las relaciones resistencia-madurez y la edad equivalente de acuerdo a los métodos de Nurse-Saul y la ecuación de Arrhenius, que permitieron concluir que, de acuerdo a los valores mostrados por las predicciones, el método de madurez es un método eficiente y rápido de determinar la resistencia.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la industria de la construcción ha tomado como un parámetro importante el aseguramiento de calidad de las obras en sitio a través de la resistencia a compresión, este parámetro es importante para determinar el tiempo optimo requerido para realizar actividades como el descimbrado y el postensado; lo que conlleva a acelerar los procesos de construcción de manera más rápida y segura, con la finalidad de ahorrar tiempo y dinero, surgiendo así, la necesidad de tener una buena metodología para estimar y predecir la resistencia a la compresión del concreto en el lugar de manera confiable. Actualmente los métodos de predicción no son tan confiables ya que se realizan a través de cilindros elaborados en condiciones estándar de laboratorio que no representan las condiciones reales de la obra, debido a que influyen factores difíciles de controlar como: la temperatura, la humedad del ambiente, la colocación, la compactación del concreto, la mano de obra, etc. lo que en ocasiones repercute en errores de predicción de la resistencia. Debido a las importantes variaciones que se presentan con los métodos convencionales, ha surgido la necesidad de implementar métodos de predicción más eficientes que evalúen esta propiedad directamente de la estructura; uno de los más destacados es el método de madurez que se desarrolló a finales de 1940 y se encontró que la resistencia del concreto tiene una gran influencia basada a partir del desarrollo de temperaturas internas del concreto respecto al tiempo.

Aunque el método de la madurez ha existido desde la década de los 40's, avances considerables han hecho de este método una opción práctica, simple y económica para determinar el desarrollo de la resistencia del concreto en el lugar. El desarrollo de la temperatura en concreto se produce debido a la hidratación de los materiales cementantes y al ambiente en que se encuentra la estructura, mediante el uso de un dispositivo de registro de temperatura, se mide y registra la temperatura del concreto, lo que permite calcular la madurez y la resistencia del concreto en tiempo real a partir de la historia de temperatura en el lugar. El índice de madurez y el desarrollo de la resistencia del concreto pueden estar relacionados. Una vez establecida esta relación resistencia-madurez, puede utilizarse para estimar la resistencia del concreto en el lugar.

Además de la madurez es importante considerar otros métodos alternativos para llevar un mejor control en el aseguramiento de la calidad y la resistencia de las estructuras en el lugar y una opción viable son los ensayos semidestructivos. Los cuales brindan resultados reales y confiables de la resistencia sin comprometer la integridad de la estructura sometida a prueba. Estos métodos no se aplican en México normalmente, por lo que este proyecto es de suma importancia y demostrará su viabilidad en prácticas futuras.

1.1. Planteamiento del problema

Comúnmente, la estimación de la resistencia a compresión del concreto en las estructuras se realiza por cilindros elaborados en condiciones de manera estándar que no representan alguno de los escenarios ambientales en los que el concreto se puede encontrar en la obra después de su colocación, ya que las condiciones en un cilindro son muy diferentes a las que se presentan en la estructura; por consecuencia, existe una alta posibilidad de que se incurra en errores, lo que repercute en la mayoría de los casos en los valores de la resistencia real, creando incertidumbre y desconfianza en la seguridad de un proyecto determinado.

Esto genera grandes pérdidas de tiempo y económicas en la obra, debido a que la programación de las actividades posteriores para seguir ejecutando la construcción depende en gran medida de la resistencia del concreto. Si existe una incertidumbre en este valor, en la mayoría de los casos se procede a implementar algún método no destructivo para determinar la resistencia de algún elemento estructural, y si los criterios de aceptación no son los adecuados para mantener la integridad de algún elemento de concreto, la demolición de la estructura es inevitable.

¿Pueden las pruebas semidestructivas y no destructivas remplazar a los especímenes de concreto elaborados de manera estándar para mantener la verificación de la calidad del concreto con un nivel de confianza similar o mejor?

1.2. Hipótesis

Las pruebas no destructivas/semidestructivas como: el método de madurez, la prueba de extracción Lok-test y los núcleos de concreto, para un amplio rango de resistencias prácticas a la compresión (200-500 kgf/cm²), ayudarán a establecer correlaciones confiables de la resistencia a la compresión del concreto obtenida a través de cilindros estándar para ser utilizadas en la práctica que ayudará a obtener información con el mismo o mejor grado de certidumbre que el proporcionado por los cilindros estándar.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Establecer correlaciones entre los métodos semidestructivos (núcleos de concreto y pull-out “Lok-test”), métodos no destructivos (método de madurez) y el ensaye estándar a compresión, verificando resistencias típicas del concreto (200-500 kgf/cm²), así como analizar sus incertidumbres y estimar cuáles métodos son los más apropiados para determinar esta propiedad mecánica del concreto.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterización de las propiedades de los materiales (Agregados, Aditivo y Cemento).
- Establecer en el laboratorio proporcionamientos de concreto para resistencias a la compresión de 200 -500 kgf/cm² en base a lo que se usa en la práctica.
- Determinar las propiedades del concreto en estado fresco.
- Determinar la resistencia a la compresión a 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días para los cilindros de 10 x 20 cm, núcleos de 2 in (4.5 cm) y núcleos de 3 in (6.9 cm) elaborados bajo condiciones de curado estándar.
- Estimar la fuerza de extracción a las edades de 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días bajo condiciones de curado estándar a través del ensayo de extracción Pull-Out.

Método de madurez

- Llevar un control del desarrollo de la temperatura interna del concreto y de la resistencia a la compresión a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días bajo condiciones de curado estándar.
- Determinar experimentalmente la energía de activación (E_a) de los concretos en estudio para aplicarla a la ecuación de Arrhenius al método de madurez.
 - Determinar los tiempos de fraguado del concreto a una temperatura mínima, máxima e intermedia de acuerdo la norma ASTM C403

- Determinar experimentalmente el dato de la temperatura T_0 de acuerdo a los procedimientos marcados en la norma ASTM C1074 para aplicar la ecuación de Nurse-Saul al método de madurez.
- Obtener la relación Resistencia-madurez y la edad equivalente para cada valor de T_0 y E_a encontrado y aplicarlos a cada mezcla en estudio.
- Realizar correlaciones entre distintos métodos para evaluar la eficiencia de estas pruebas con respecto a los cilindros estándar.
- Comparar los resultados encontrados en la investigación con los resultados de correlaciones que existen actualmente

1.4. Justificación

El método de la madurez es utilizado para verificar la resistencia y calidad del concreto en el lugar mejorando el control y aseguramiento de las obras de construcción, actualmente este método es usado en lugares como Canadá, EUA, y Europa como una herramienta adicional para evaluar la resistencia de las estructuras. En países en vías de desarrollo como en México, la estimación de la resistencia se realiza a través cilindros elaborados de manera estándar en condiciones óptimas de laboratorio que no representan las condiciones reales en las que se encuentran las estructuras. Los cilindros que se realizan en sitio para conocer la resistencia de la estructura se utilizan para programar actividades como: retiro de cimbras y apuntalamientos, para realizar el postensado y pretensado, determinar el tiempo en que se puede abrir el tráfico de carreteras y

puentes etc. Para la programación del tiempo de inicio óptimo de estas actividades, se pueden realizar con el método de madurez; ya que la medición de la resistencia se puede monitorear en cualquier momento con un acercamiento de la resistencia en tiempo real, además de reducir en gran medida los tiempos de construcción, permite disminuir la cantidad de cilindros realizados en la obra, trayendo consigo, beneficios económicos en el sector de la industria de la construcción.

Además de los ensayos de especímenes cilíndricos y cúbicos, la resistencia a la compresión del concreto se puede determinar por métodos no destructivos como el método de madurez y también a través de métodos semidestructivos como lo son los métodos de extracción Capo y Lok-Test que nos permiten determinar si la resistencia en el lugar es suficiente para la aplicación temprana de cargas debidas al descimbrado o la aplicación de presfuerzo, otra de la ventaja de estos métodos semidestructivos es que el daño que se genera en la estructura no compromete las capacidades estructurales de la misma, permitiendo así; obtener un resultado rápido, confiable y directo del elemento analizado. El daño que se genera es aproximadamente 2.5 cm de profundidad; esto justifica que el uso de estos métodos en comparación con la extracción de un núcleo de concreto nos brinda resultados de campo más rápidos y con menor daño generado en el elemento de concreto. además, otra aplicación es la verificación de la resistencia en el lugar cuando los especímenes de curado estándar no pasan los criterios de aceptación.

CAPITULO 2

2. Antecedentes

2.1. Ensayo de extracción (Pull-Out)

El equipo de prueba de extracción mide la fuerza requerida para extraer un inserto de metal que está incrustado en la superficie de concreto. El equipo mecanizado unido a un inserto montado en forma se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Equipo de extracción en operación

Se usa una relación para relacionar la fuerza de extracción máxima con la resistencia a la compresión del concreto. La Figura 2 muestra un inserto extraíble incrustado cerca de la superficie de concreto. Un vástago de carga, que está conectado al inserto y que transmite las fuerzas al concreto a través de un anillo de rodamiento, carga el inserto. Se crea una superficie de fractura de forma cónica debido a la geometría de prueba.

El término del ángulo se refiere a dos veces el ángulo (α) entre una línea dibujada desde el borde de la cabeza del inserto al anillo del rodamiento y una línea vertical dibujada desde el borde de la cabeza del inserto [1].

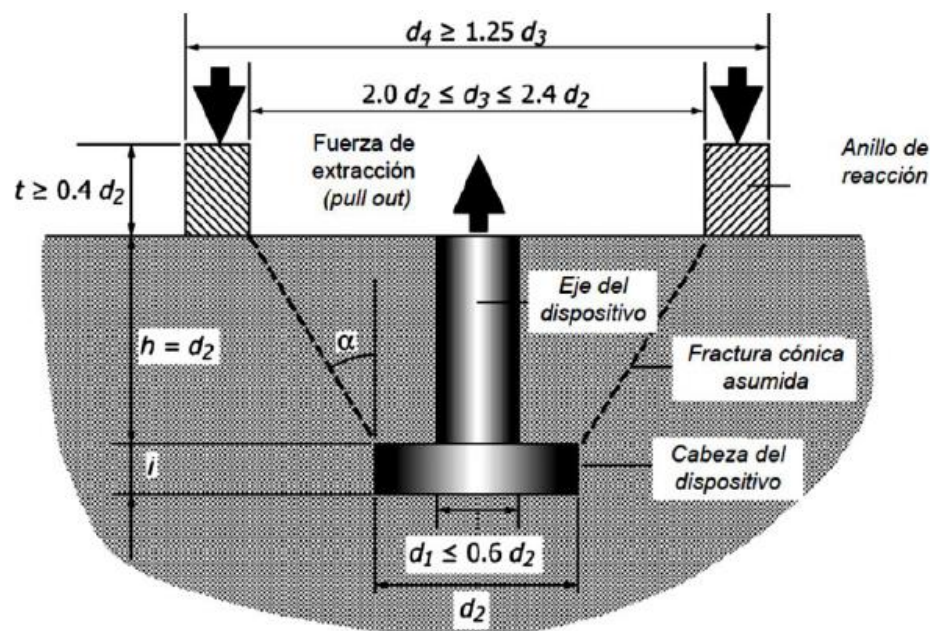


Figura 2. Esquema de la sección transversal del ensayo de extracción (Pull-Out) colado en obra

Carino en 1991 reportó que el desarrollo conocido más antiguo de la prueba de extracción comenzó en el Instituto Central para la Investigación de Edificios Industriales en la Unión Soviética por Skramtajew. El sistema de extracción fue continuamente modificado por investigadores de todo el mundo. Estas modificaciones continuaron durante años hasta que Kierkegaard-Hansen desarrolló una prueba de extracción que finalmente se convirtió en el estándar común para la industria [2] [3].

En 1975 Kierkegaard-Hansen [4] realizó un proyecto de investigación para encontrar la geometría óptima de la prueba de extracción para ser aplicada en campo con equipos simples y fáciles de manejar. Los resultados de las pruebas demostraron que se puede obtener una alta correlación entre la fuerza de extracción máxima y la resistencia a la compresión. A través de una serie de estudios, Kierkegaard-Hansen estableció la profundidad óptima en la que debería estar el inserto, el diámetro de la cabeza del inserto y el diámetro del anillo del rodamiento para una correlación óptima con la resistencia a la compresión. La profundidad de empotramiento óptima del inserto se determinó que era de 25 mm (1 in). En cuanto al diámetro de la cabeza, se concluyó que el diámetro del disco no influyó en el comportamiento de la prueba; por lo tanto, se eligió un diámetro de 25 mm (1 in). Se determinó que el tamaño óptimo del anillo de rodamiento era de 55 mm (2.2 in). Para esta geometría, el ángulo del vértice es igual a 62 °. En la Figura 3 se muestra un esquema de la geometría del inserto propuesto por Kierkegaard-Hansen. El sistema Lok-Test, suministrado por Germann Instruments, tiene la misma configuración que se muestra en la Figura 3.

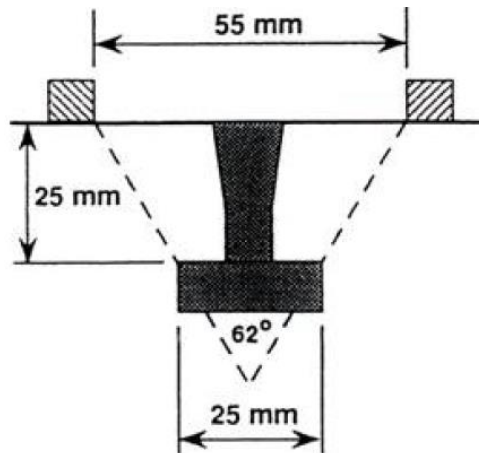


Figura 3. Esquema del inserto propuesto por Kierkegaard-Hansen

Muchos investigadores y otros en la industria han llegado a la conclusión de que la prueba de extracción es un método preciso para probar la resistencia en el lugar [5]. Carino en 1997 declaró: "La prueba de extracción en el lugar de colado es una de las técnicas más confiables para estimar la resistencia in situ del concreto durante la construcción" [6]. Bungey y Soutsos (2000) también creyeron que la prueba de extracción es una prueba precisa y declararon que "las pruebas de extracción se pueden aplicar con éxito al concreto en las estructuras para generar estimaciones de la resistencia en el lugar" [7].

Kierkegaard-Hansen y Bickley en 1978 concluyeron que "el sistema Lok-Test de pruebas de extracción ofrece una manera simple, confiable, económica y no destructiva de determinar la resistencia real en el lugar del concreto en todos

los niveles de resistencia de una manera práctica y estadísticamente válida” [8]. En 1982 Hubler resumió que " La prueba Lok-Test permite que el concreto colado se evalúe con mucho mejor control que con cualquier otro método de prueba, y que está cerca de un sistema a prueba de fallas como la tecnología moderna, hasta el momento" [9].

En 1980 Malhotra y Carette concluyeron que "la resistencia del concreto en el lugar puede determinarse cuantitativamente usando la técnica de extracción. La técnica es simple, efectiva y barata, y los resultados de las pruebas se pueden reproducir con un grado aceptable de precisión" [10].

2.1.1. Mecanismos de falla de la prueba de extracción (Pull-Out)

La prueba de extracción somete al concreto a una carga estática. Por lo tanto, debería ser posible calcular las tensiones internas en el concreto y predecir el inicio del agrietamiento y la carga de extracción final. Esto es deseable para que la última carga de extracción pueda relacionarse con las propiedades de resistencia uniaxial del concreto. Pero, debido a la distribución de la tensión interna provocada por la fuerza de extracción, no es fácil de calcular, Carino en 1991 mencionó que el estado de la tensión se ve alterado por la presencia de partículas de agregado grueso dentro de la matriz cementante, y el criterio fundamental de falla para el concreto no se comprende completamente [11].

Kierkegaard-Hansen en 1975 estableció un sistema óptimo de inserción y extracción, posteriormente se enfocaron a un par de proyectos de investigación para comprender el mecanismo de falla de la prueba de extracción [4]. La mayoría de las investigaciones fueron en forma de estudios analíticos; Sin embargo, se llevaron a cabo principalmente dos estudios experimentales:

2.1.1.1. Pruebas a gran escala

Stone y Carino en 1983 [12] realizaron una prueba a escala para analizar el mecanismo de falla de la prueba de extracción. La prueba se amplió 12 veces para permitir la inserción de medidores de tensión en los insertos. Se analizaron dos muestras con ángulos de vértice de 54° y 70° . Al analizar las lecturas del medidor de tensión en función de la carga de extracción, Stone y Carino concluyeron que la secuencia de falla estaba compuesta de tres fases [13] Figura 4:

- Fase I: En aproximadamente $1/3$ de la carga final, comienza el agrietamiento circunferencial en el borde del cabezal de inserción.
- Fase II: Finalización del agrietamiento circunferencial, desde la cabeza de inserción al anillo del rodamiento, a aproximadamente $2/3$ de la carga final

Fase III: Falla de corte de la matriz (mortero) y degradación de la adherencia del agregado que comienza en aproximadamente el 80% de la carga final

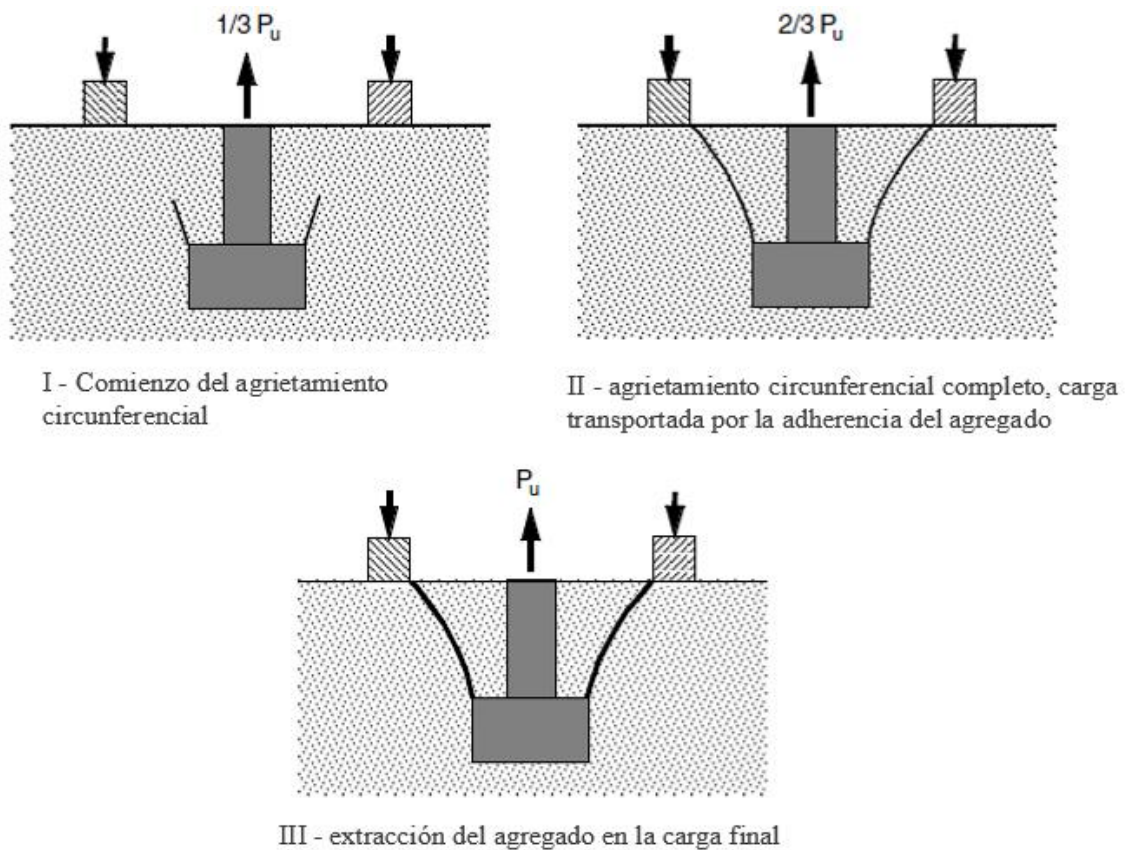


Figura 4. Secuencia de falla basada en pruebas de extracción a gran escala

[11].

Stone y Carino [12] concluyeron que el último mecanismo de carga era el entrelace o adherencia entre agregados que se muestra en la Fase III, de la Figura 4. La Figura 5 es una ilustración de este fallo de entrelace del agregado.

Carino en 1991 afirma que, si el desplazamiento fuera perpendicular a la grieta de falla, la sección se separaría sin necesidad de fuerza adicional. Como muestra la Figura 4. El movimiento se inclina hacia la grieta de falla, creando un interbloqueo entre la sección superior y el agregado. Por lo tanto, se transmite una fuerza a través de la superficie que requiere que se aplique una fuerza mayor para eliminar la sección superior. Esta fuerza adicional es el modo de falla de corte explicado en la Fase III de la Figura 4. Esto significa que la carga final para la prueba se obtiene cuando el agregado grueso presente en la interfaz de la grieta se elimina completamente de la pasta de cemento alrededor de esta región [11].

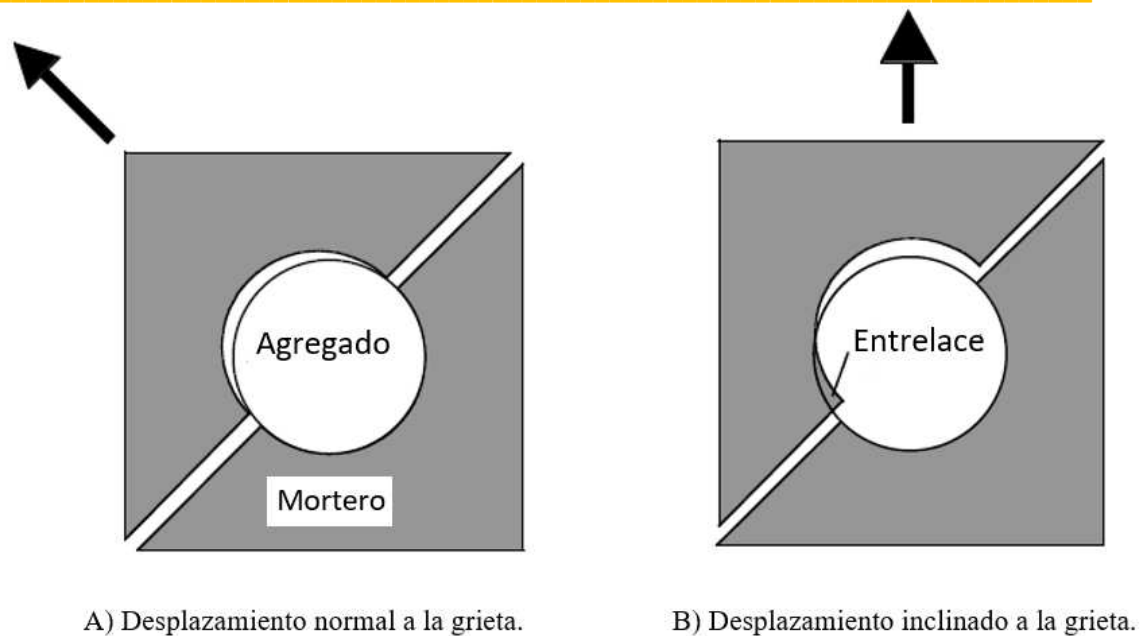


Figura 5. Modelo para mostrar el mecanismo del entrelace del agregado durante la prueba de extracción.

Si el mecanismo de entrelace del agregado gobernara la carga de extracción definitiva, Stone y Carino argumentaron que para una matriz homogénea (sin agregado), se alcanzaría la carga final cuando la grieta circunferencial se extendiera desde la cabeza del inserto hasta el anillo del soporte. La verificación de esta hipótesis se realizó mediante pruebas de extracción en concreto y en mortero, en las que el desplazamiento del cabezal de inserción se midió en función de la carga de extracción. En la Figura 6 compara los historiales de desplazamiento de carga para las pruebas de extracción (ángulo de vértice = 62°) En concreto y en mortero. La carga de extracción se ha normalizado dividiendo por el producto de la resistencia a la compresión de las muestras cilíndricas acompañantes y el área del tronco cónico

idealizado. En cargas pequeñas, la respuesta de carga-desplazamiento es lineal. Aproximadamente a $1/3$ de la carga final, la respuesta se desvía de la linealidad a medida que la grieta circunferencial se propaga entre la cabeza y el anillo del rodamiento. Cuando la grieta circunferencial se forma completamente, hay una gran diferencia entre las respuestas de los especímenes de concreto y mortero. En el mortero, no hay entrelace entre el agregado y la carga cae bruscamente.

Por otro lado, para el concreto hay un gran aumento en el desplazamiento de la cabeza sin un aumento en la carga. Entonces la carga comienza a aumentar hasta que se alcanza la carga máxima. Más allá de la carga final, la carga disminuye gradualmente al aumentar el desplazamiento de la cabeza. Por lo tanto, la prueba de extracción en el concreto se comporta de una manera más "dúctil" que la prueba en el mortero. tal comportamiento se muestra en la Figura 6. En donde se aprecia claramente que el comportamiento del concreto es más dúctil.

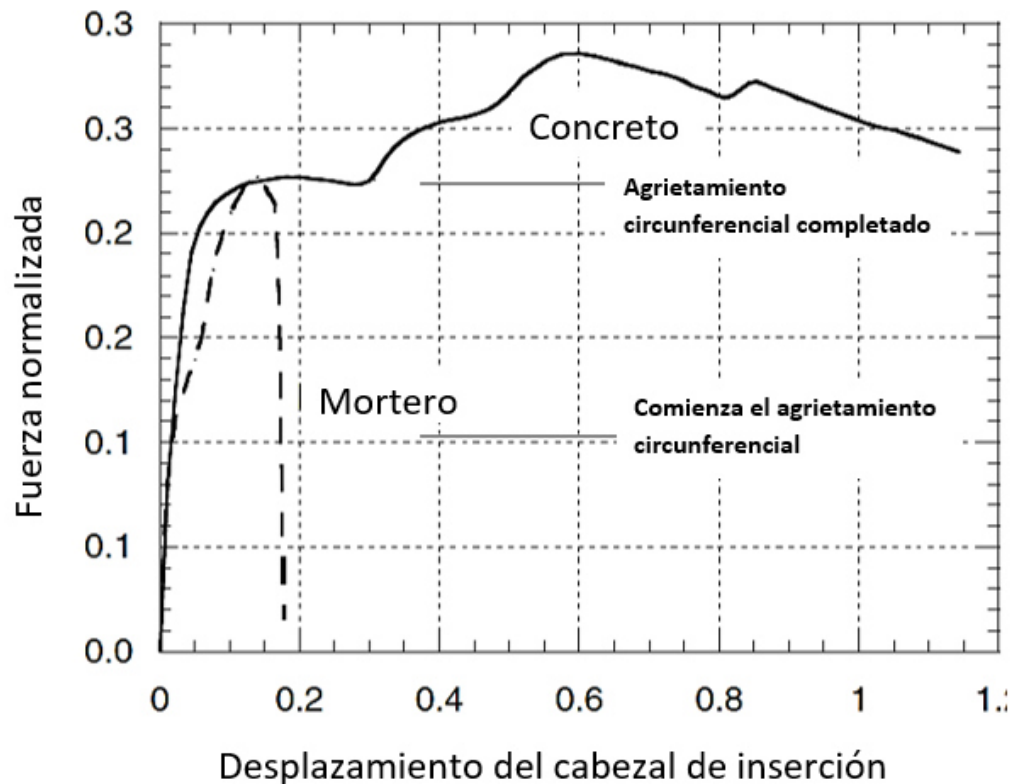


Figura 6. Desplazamiento del cabezal de inserción (mm)

2.1.2. Análisis de Micro Agrietamiento

Krenchel y Shah en 1985 [14] realizaron un estudio de los planos de falla de la prueba de extracción. Krenchel y Bickley (1987) [15] concluyeron del estudio de Krenchel y Shah que dos sistemas de grietas circunferenciales están involucrados en la falla. El primer y principal modo de agrietamiento comienza entre el 30% y el 40% de la carga final. El agrietamiento se extiende desde la cabeza del inserto en un ángulo de entre 100° y 135° , desde la superficie vertical de la parte superior de la cabeza, hasta un punto debajo del anillo. El segundo

sistema de agrietamiento es el que define la región de falla de forma cónica del concreto que rodea el inserto y se desarrolla completamente en la carga final. Krenchel y Bickley concluyeron que existían tres etapas del mecanismo de falla, como se muestra en la Figura 7.

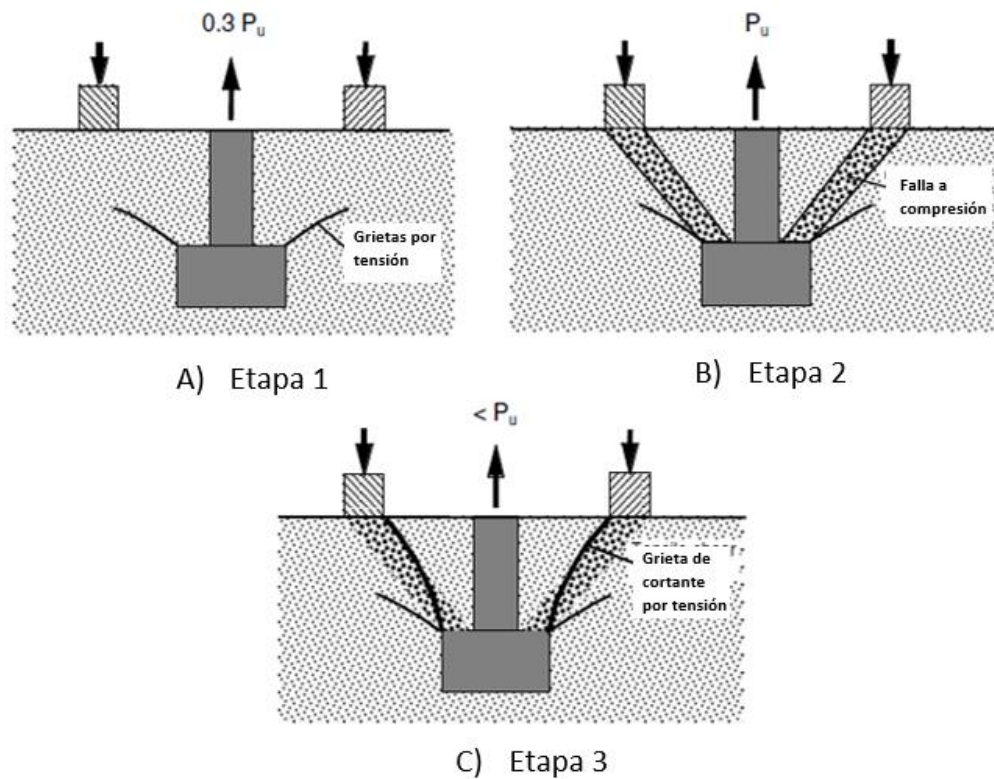


Figura 7. Mecanismo de falla de las pruebas de extracción según Krenchel y Bickley [14].

Etapa 1: carga entre el 30% y el 40% de la carga final, las "grietas de tensión" comienzan a aparecer en la cabeza del inserto.

Etapa 2: en la zona truncada, numerosas microfisuras estables se desarrollan a partir de tensiones creadas por fuerzas compresivas. Las grietas conectan la cabeza de inserción al anillo del rodamiento.

Etapa 3: se desarrolla una grieta circunferencial en la carga final que forma la región final de falla de forma cónica.

Krenchel y Bickley mencionan que, dado que “el micro agrietamiento que se produce en la etapa 2 es responsable y está directamente relacionado con la carga final en este procedimiento de prueba, parece bastante lógico que siempre se obtenga una relación tan estrecha con la resistencia a la compresión del concreto”. Es este razonamiento el que permite concluir que, con la geometría correcta del sistema de extracción, se puede obtener una falla de compresión y, al hacerlo, se puede establecer una correlación entre la carga de extracción y la resistencia a la compresión del concreto [16].

Carino en 1991 concluyó que el mecanismo de falla para la prueba de extracción es una falla de compresión o una falla de corte debido al entrelace entre el agregado y la pasta. Aunque no hay acuerdo sobre el plano de falla exacto, Carino resalta que existe una buena correlación entre la resistencia a la extracción y la resistencia a la compresión del concreto y que la prueba de extracción tiene buena repetibilidad [11].

2.1.3. Variabilidad de la prueba de extracción (Pull-Out)

La "repetibilidad", también conocida como variabilidad dentro de la prueba, se refiere a la dispersión de los resultados de la prueba cuando la prueba se realiza varias veces con el mismo personal, equipo y procedimientos [11]. En 1991 Carino también afirma que el número de pruebas a realizar para cualquier procedimiento de prueba para obtener la resistencia promedio está determinado por la repetibilidad de la prueba y la certeza deseada y además menciona que la prueba de extracción ha demostrado ser un método de prueba muy confiable.

En 1982 Bickley realizó una revisión de aproximadamente 4,300 pruebas de extracción y reveló que la desviación estándar de la resistencia de extracción definitiva era constante [17]. La Figura 8 muestra datos de Stone, Carino y Reeves obtenidos el año de 1986 que comparan el coeficiente de variación con la carga de extracción promedio para tres agregados diferentes en un ángulo de vértice de 70° [18]. La segunda serie utilizó la misma grava que la primera serie, pero se probó un ángulo de vértice de 54° . Para agregados normales, el coeficiente de variación varía de 4% a 15%.

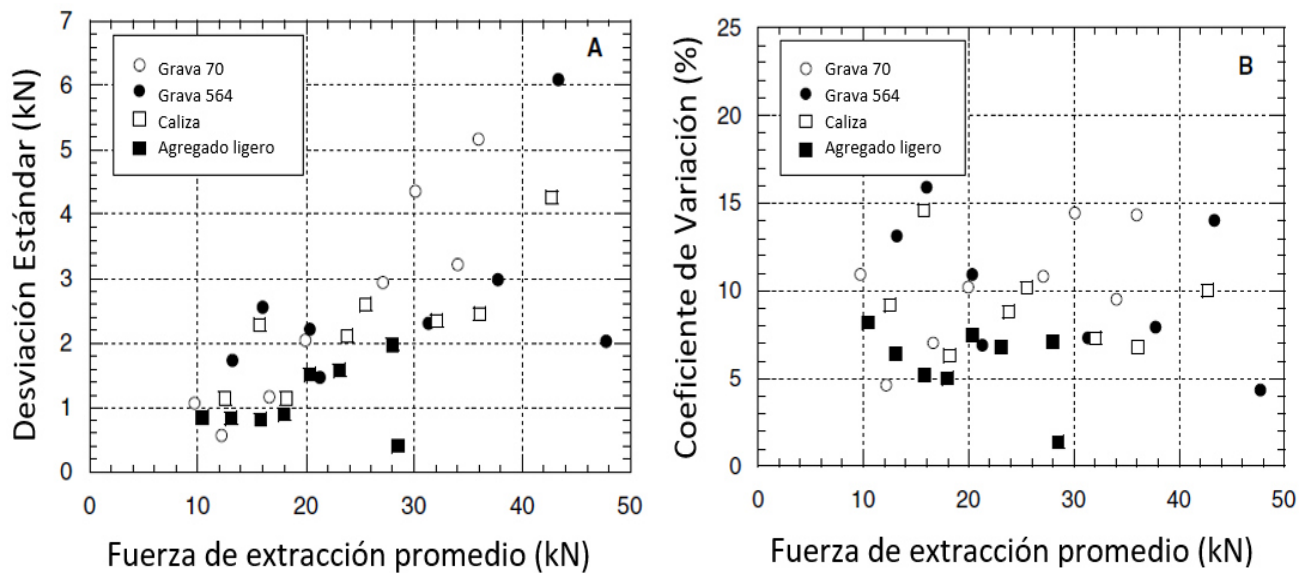


Figura 8. Repetibilidad de la prueba de extracción para diferentes tipos de agregados en el estudio de Stone, Carino y Reeve.

Los resultados del coeficiente de variación de todas las pruebas de los investigadores con diferentes agregados, ángulos de vértice, profundidad de empotramiento y tamaños máximos de agregados se presentan en la Tabla 1. Los valores promedio para el coeficiente de variación varían de 4% a 15% con un valor promedio de 8% [19].

						Coeficiente de Variación (CV)	
Autores	Angulo Aprox (°)	Profundidad de embebido (mm)	Tamaño Máximo del Agregado	Tipo de agregado	Tamaño de la muestra	Rango (%)	Promedio (%)
Malhotra &							
Carrete (1980)	67	53	19	Caliza	3	2.3-6.3	3.9
Malhotra (1975)	67	53	25	Grava de rio	2	0.9-14.3	5.3
Bickley (1982)	62	25	10	Desconocido	8	3.2-5.3	4.1
Khoo (1982)	70	25	20	Granito	6	1.9-11.8	6.9
Carrete &	67	53	19	Caliza	4	5.2-14.9	7.1
Malhotra (1984)	62	25	19	Caliza	10	5.2-14.9	8.8
Keiller (1982)	62	25	20	Caliza	6	7.3-31	14.8
	70	25	19	Grava de rio	11	4.6-14.4	10.2
Stone, Reeve &	70	25	19	Caliza	11	6.3-146	9.2
Carino (1986)	70	25	19	Agregado Ligero	11	1.4-8.2	6
	54	25	19	Grava de rio	11	4.3-15.9	10
Bocca (1984)	67	30	12	Grava	24	2.8-6.1	4.3

Tabla 1. Resumen del coeficiente de variación dentro de la prueba de extracción [19].

Stone y Giza realizaron un estudio en 1985 para investigar el coeficiente de variación con cambios en el ángulo del vértice, la profundidad de empotramiento, el tamaño y el tipo agregado. La Figura 9 (A) muestra el efecto de variar el ángulo del vértice. La Figura 9 (B) muestra el coeficiente de variación para varias profundidades de incrustación. La Figura 9 (C) muestra los efectos de los cambios en el tamaño agregado. La Figura 9(D) muestra los efectos del tipo agregado [20].

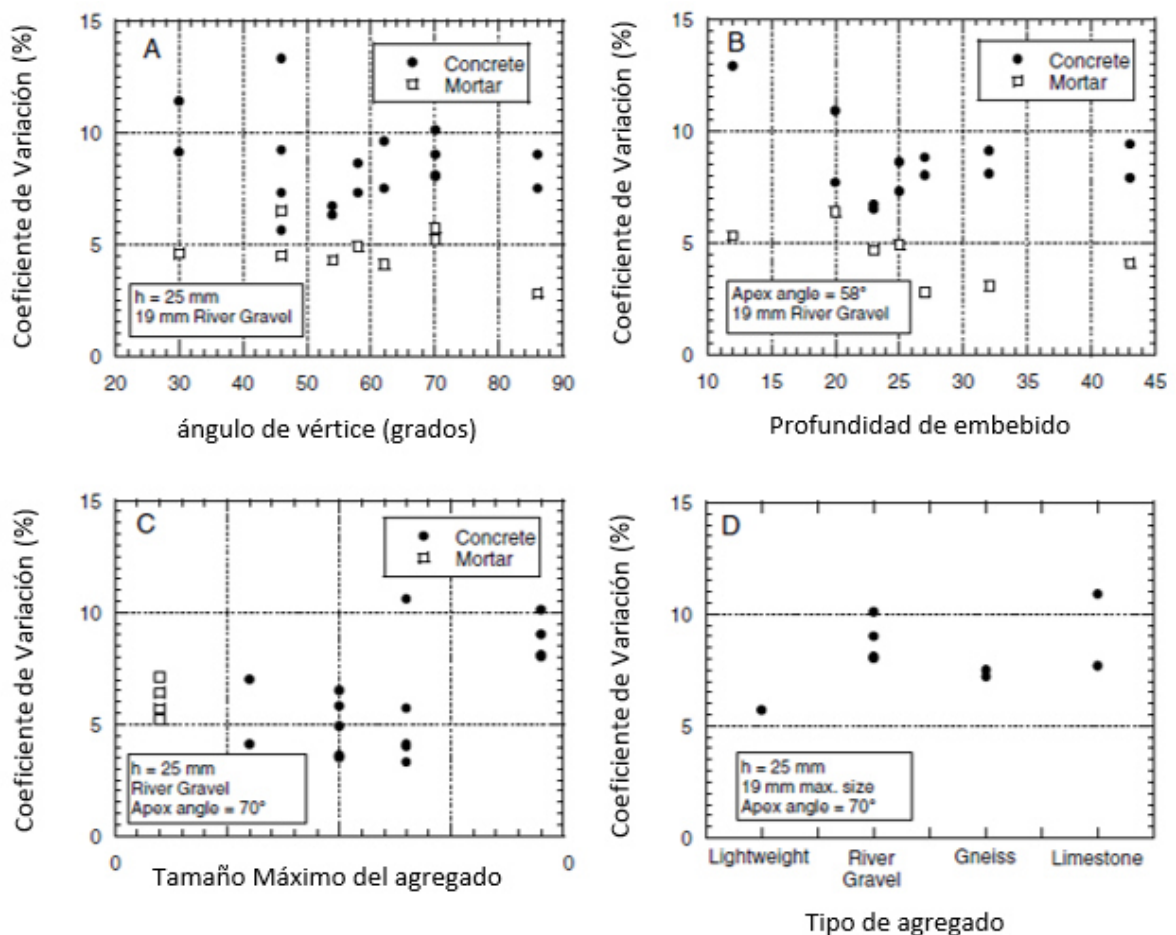


Figura 9. Coeficiente de variación en función de: (A) ángulo del vértice, (B) profundidad de empotramiento, (C) tamaño máximo de agregado y (D) tipo de agregado.

El ángulo del vértice varía entre 30° y 86° y no tiene un gran efecto en la repetibilidad. Al igual que el ángulo del vértice, la profundidad de empotramiento no afecta mucho la repetibilidad. Para tamaños de agregados variables, los coeficientes de variación son muy cercanos para tamaños de agregados de 6, 10 y 13 mm. Para el tamaño agregado de 19 mm, el coeficiente de variación promedio fue ligeramente más alto que los otros. Finalmente, para diversos tipos de agregados, los coeficientes de variación son los mismos para los agregados normales, y el agregado liviano tiene un coeficiente de variación promedio más bajo.

El coeficiente de variación promedio para la prueba de extracción es de alrededor del 8% según ASTM C 900 (2001) [21] y Carino en 1991 [11]. Se ha demostrado que la repetibilidad de la prueba de extracción puede ser relativamente alta, por lo tanto, se debe realizar un mayor número de pruebas para determinar la resistencia promedio de la extracción. La norma [21] recomienda que se realicen un mínimo de cinco pruebas cada vez debido al coeficiente de variación relativamente alto.

2.1.4. *Relación de resistencia*

El término relación de resistencia se usa para la relación entre la resistencia a la extracción y la resistencia a la compresión del concreto que se obtiene mediante el análisis de regresión de los datos de prueba. En la revisión de la

prueba de extracción temprana desarrollada en la antigua Unión Soviética, Skramtajew informó que para el concreto con resistencias obtenidas a través de cubos entre 1.5 y 10.5 MPa (200 a 1500 psi), había una relación constante entre la carga de extracción y la resistencia del cubo [22].

Por otro lado, Tremper mostró que, en un amplio rango de resistencia del concreto, la relación entre la carga de extracción y la resistencia a la compresión no era lineal y podía verse afectada por el tipo de agregado [23].

Para mejorar la correlación entre la resistencia a la extracción y la resistencia a la compresión, Kierkegaard-Hansen introdujo un anillo de apoyo y concluyó de los resultados obtenidos en sus pruebas que: "No hay nada que indique que la relación entre las dos mediciones de resistencia no sea lineal". Sin embargo, Kierkegaard-Hans encontró que la relación era lineal pero no proporcional, es decir, la línea recta tenía una intersección distinta de cero. Además, encontró que la relación dependía del tamaño máximo del agregado. Sugirió las siguientes relaciones de resistencia para su sistema de Resistencia-LOK:

$$P = 5.10 + 0.806C \text{ (16 mm TMA)} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$P = 9.48 + 0.829C \text{ (32 mm TMA)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

P = carga de extracción máxima (kN)

C = resistencia a la compresión del cilindro del concreto (MPa)

Por lo tanto, para una resistencia a la compresión igual al cilindro, el concreto con un agregado grueso más grande tendrá una mayor carga de extracción final.

Peterson fabricante del sistema LOK-TEST propuso originalmente la siguiente relación de resistencia para todo el concreto con tamaños de agregados de hasta 32 mm (1 1/4 in):

$$P = 5 + 0.8C$$

Ecuación 3

Bickley mencionó que las pruebas de correlación realizadas en seis sitios de prueba, utilizando el mismo sistema LOK-TEST, dieron como resultado líneas rectas que diferían de la Ecuación 3. La Tabla 2 resume los valores de mejor ajuste de las pendientes e intercepciones obtenidos por Bickley [24]. La Tabla 2 muestra que hay intercepciones positivas y negativas y que algunas de las pendientes son significativamente mayores que el valor recomendado de 0.8 kN/MPa. Se demostró que, en general, la Ecuación 3 es una relación "conservadora", es decir, para una carga de extracción dada, la Ecuación 3 estima una resistencia a la compresión más baja que las líneas rectas en la Tabla 2.

La falta de concordancia entre las relaciones de resistencia obtenidas con el mismo sistema de prueba y el resultado ilógico de una intercepción distinta de cero ha causado escepticismo entre los usuarios potenciales del método de

prueba de extracción [11]. Para un sistema de prueba dado, no existe una relación de resistencia única aplicable a todo el concreto. Además, se muestra que la correlación para una combinación particular de materiales y sistema de prueba no es necesariamente lineal. La discusión se limita a las relaciones entre la carga de extracción final y la resistencia a la compresión del cilindro.

Rango de resistencias (Mpa)	Intercepto a (kN)	Pendiente b (kN/Mpa)
7.1-38.3	-0.9	0.88
12.7-28.8	-2.0	1.05
9.7-44.4	2.4	0.85
5.9-32.5	1.7	0.81
13.7-34.4	-2.0	1.06
8.8-25.2	2.7	0.89

Tabla 2. Relaciones de Resistencia lineal de Bickley [24] con el sistema LOK-TEST ($P = a + bC$)

En primera instancia, se investigó la forma de la relación de resistencias. La Figura 10. muestra los datos de correlación obtenidos por Stone, Carino & Reeve (1986) utilizando concreto hecho con piedra caliza triturada de 19 mm (3/4 in.) [25]. El sistema de prueba de extracción tenía un ángulo de 70 ° y una

profundidad de empotramiento de 25 mm (1 in.). En lugar de utilizar una relación lineal, se consideró una función de potencia de la siguiente manera:

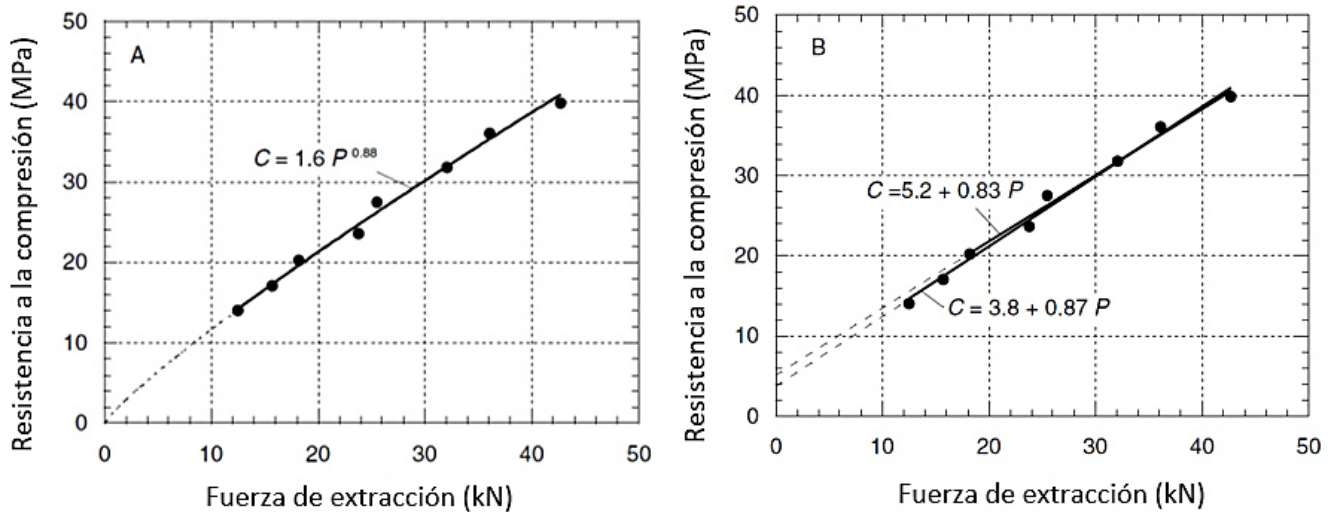


Figura 10. Relaciones de resistencia para el concreto elaborado con piedra caliza triturada: A) Curva en función potencial y B) función lineal para diferentes rangos de resistencia [25].

$$C = \alpha P^\beta \quad \text{Ecuación 4}$$

La función de potencia de mejor ajuste para los datos de la Figura 10 A) es:

$$C = 1.6 P^{0.86} \quad \text{Ecuación 5}$$

Ahora, examinando que sucede si se supone que una relación lineal tiene la ecuación:

$$C = a + bP \quad \text{Ecuación 6}$$

Si se consideran todos los puntos, la mejor línea recta es:

$$C = 3.8 + 0.87P \quad \text{Ecuación 7}$$

Si se consideran solo los seis puntos para resistencias de compresión superiores a 20 MPa (2900 psi), la mejor línea recta es:

$$C = 5.2 + 0.83P \quad \text{Ecuación 8}$$

Se observa que las dos líneas rectas en la Figura 10 son prácticamente iguales para una resistencia a la compresión superior a 20 MPa.

Al considerar los datos de correlación para el mismo sistema de prueba, pero para el concreto hecho con grava de río de 19 mm (3/4 in.). Los datos se muestran en la Figura 11 A) y la función de potencia de mejor ajuste es:

$$C = 1.07P^{1.02} \quad \text{Ecuación 9}$$

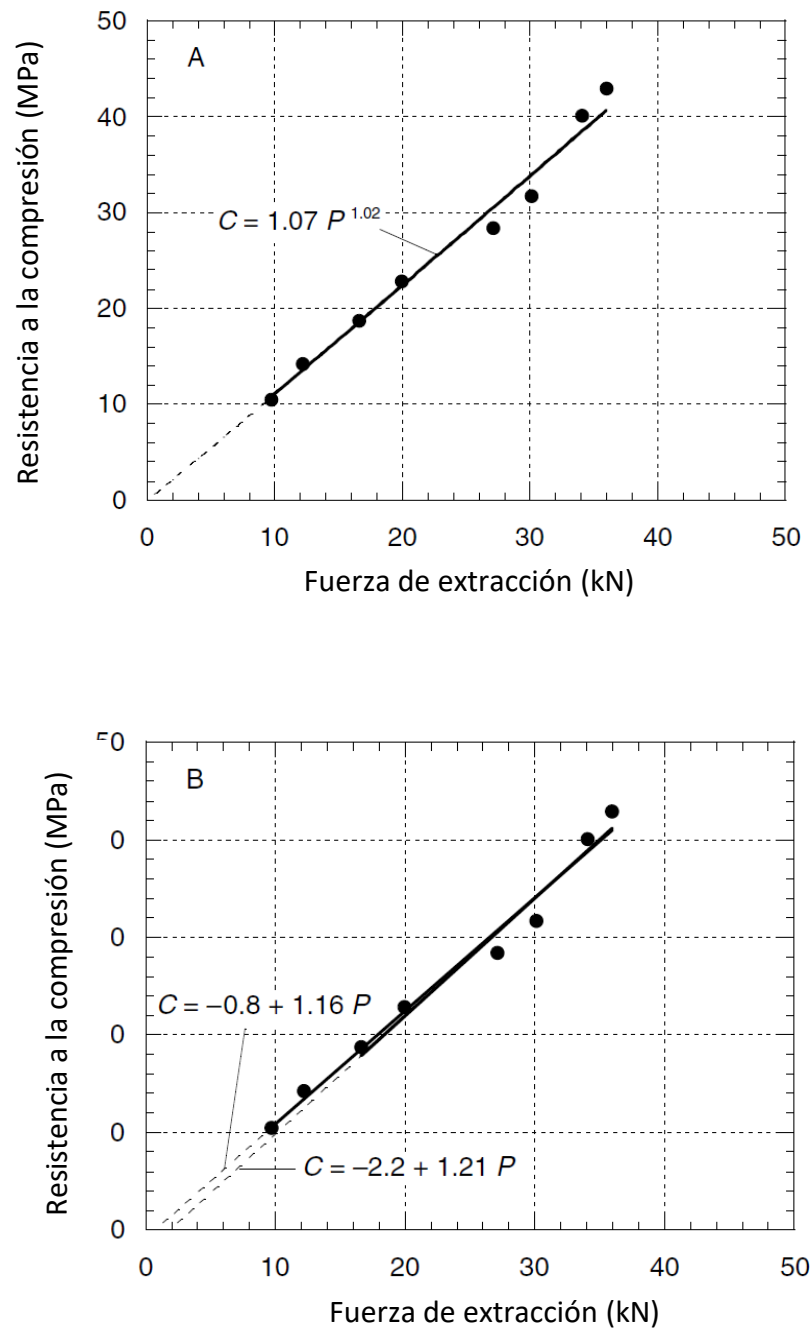


Figura 11. Relaciones de resistencia para el concreto elaborado con agregado de río:

A) relación de la función potencial, B) Relación de la función lineal para diferentes rangos de resistencias [25].

Por lo tanto, si la verdadera relación de resistencia es ligeramente no lineal y si la curvatura puede depender del tipo de agregado, se puede explicar por qué Bickle [17] reportó relaciones lineales diferentes para el mismo sistema de prueba de extracción.

Claus Germann en 1984 inventor del LOK-TEST más tarde propuso la siguiente relación, que difiere de la Ecuación 3, para concreto con resistencias a la compresión entre 3 y 25 MPa (400 y 3600 psi) [26]:

$$P = 1.0 + 0.96C \quad \text{Ecuación 10}$$

Debido a que la relación de resistencia se usa para estimar la resistencia a la compresión en función de la carga de extracción medida, es preferible tratar la resistencia a la compresión como la variable dependiente. Por lo tanto, las relaciones para el sistema LOK-TEST fueron las siguientes:

$$C = -1.0 + 1.04P \text{ (para } 3 \text{ MPa} < C < 25 \text{ MPa)} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$C = -6.3 + 1.25 P \text{ (para } C \geq 25 \text{ MPa)} \quad \text{Ecuación 12}$$

Estas dos líneas rectas se muestran en la Figura 12 A). Para propósitos de ilustración, se eligieron ocho puntos espaciados uniformemente a lo largo de esta relación de fuerza bilineal, como se muestra en la Figura 12 B). Se ajustó una función de potencia de mejor ajuste a los puntos, y la ecuación de la función es la siguiente:

$$C = 0.6P^{1.14} \quad \text{Ecuación 13}$$

Se aprecia que la función de potencia es muy idéntica a la función bilineal.

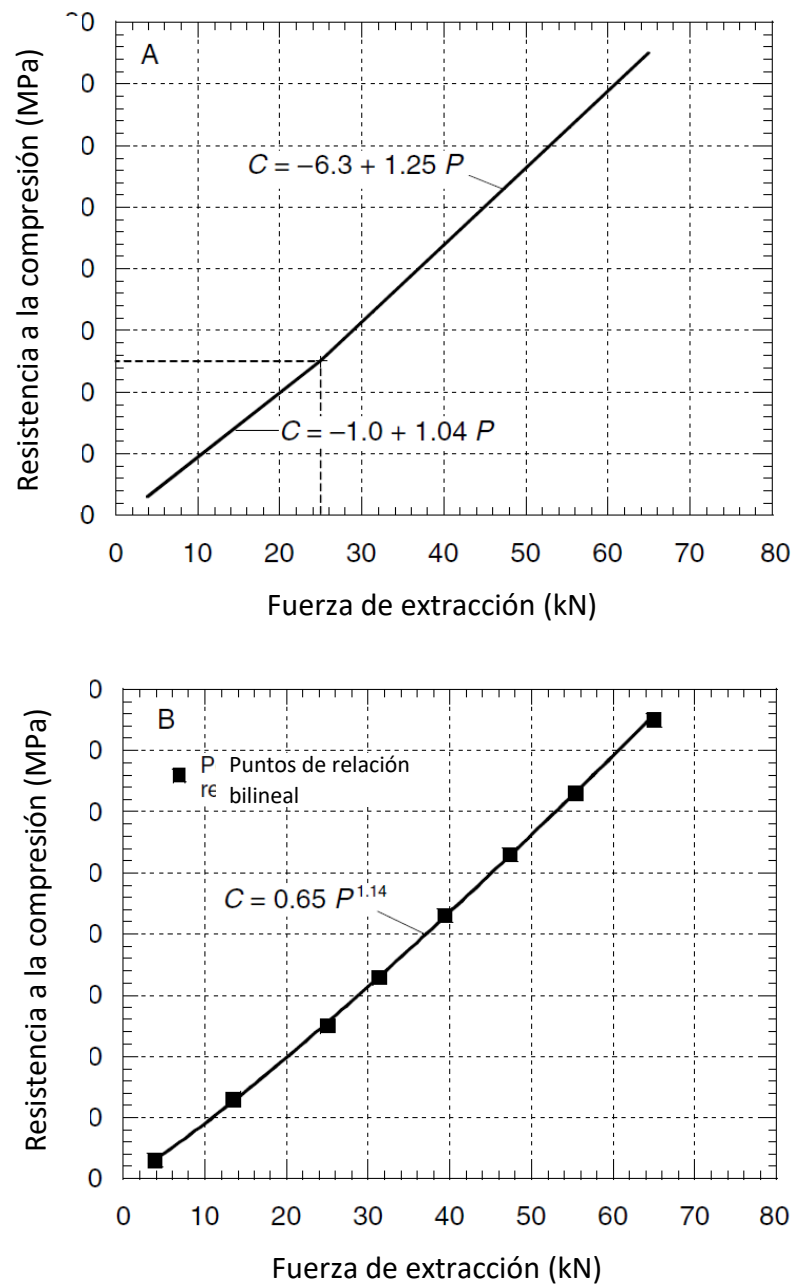


Figura 12. A) Relación de resistencia bilineal propuesta para el sistema LOK-TEST. B)

Aproximación de la función de potencia de las dos líneas [26].

La Figura 13 muestra los datos de correlación reportados por Khoo [27] para las pruebas de extracción y las pruebas realizadas a los núcleos correspondientes. La configuración de extracción tenía un ángulo de vértice de 70 ° y la profundidad de empotramiento era de 25 mm (1 in). El concreto se elaboró con granito triturado de tamaño máximo de 20 mm (0.8 in) y la resistencia a la compresión osciló entre 10 y 40 MPa (1500 y 5800 psi). La mejor relación de línea recta para los datos, según lo determinado por este autor, es:

$$C = -1.11 + 1.19P \quad \text{Ecuación 14}$$

mientras que la función de potencia de mejor ajuste es

$$C = 1.12P^{1.00} \quad \text{Ecuación 15}$$

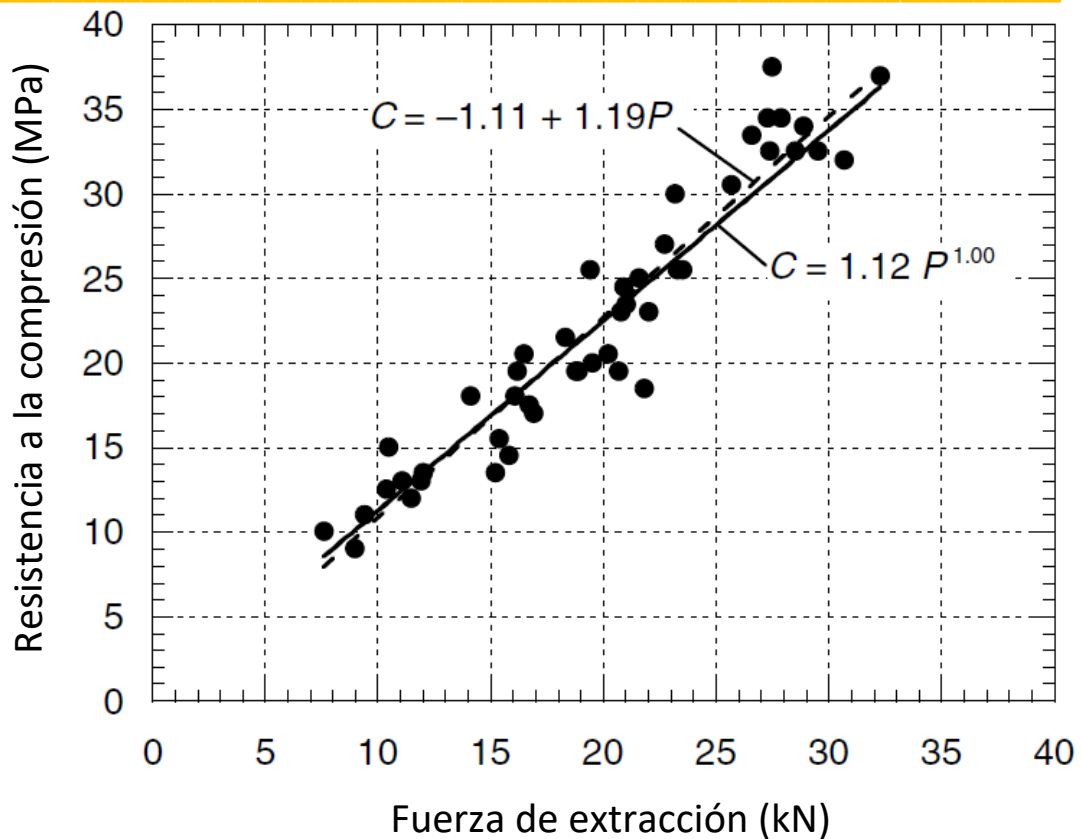


Figura 13. Datos de correlación y mejor ajuste de las relaciones de las funciones lineal y potencial [27].

Claus German en una recopilación de trabajos de 20 años de experiencia informó que desde 1970 hasta 1995, se han ejecutado un total de 28 correlaciones principales para investigar la estabilidad de la relación entre la fuerza de extracción y la resistencia del cilindro encontrada por Kierkegaard-Hansen. Las correlaciones cubren un total de 4,362 pruebas de Lok-Test y 3,124 pruebas de compresión de muestras estándar. Los parámetros investigados fueron: Tipo de cemento, relación a/c, edad, diferentes condiciones de curado,

contenidos de aire, aditivos y cenizas volantes, así como forma, tipo y tamaño del agregado (hasta Tamaño de agregado máximo de 40 mm). Solo para el uso de agregados livianos, se encontró una correlación diferente [3].

La correlación que mejor se ajustó a los resultados de los autores anteriores fue:

$$C = 0.69F^{1.12}$$

Ecuación 16

Recientemente Nicholas J. Carino y Claus Germann Petersen (2016) mostraron una correlación de concreto ligero, junto con una comparación de Pull-Out con núcleos de 100 mm x 100 mm en puentes antiguos para estimar la resistencia más profunda en la estructura que en la capa de recubrimiento y se encontró que, en promedio, la resistencia a la compresión estimada a partir de Pull-Out y la correlación general era sólo un 2.8% mayor que la resistencia de un núcleo [28].

Las correlaciones encontradas en una comparación con los núcleos de 100 x 100 mm fueron las siguientes:

$$C = 0.77F^{1.15}$$

Ecuación 17

2.2. Resistencia a la compresión de los núcleos.

Para un enfoque probabilístico de la evaluación de la resistencia, las propiedades estadísticas de la distribución de la resistencia a la compresión del concreto dentro de una estructura son de interés la resistencia media y la desviación estándar [29].

Estos parámetros pueden estimarse sobre la base de un número finito de muestras de datos directos e indirectos de la estructura. Estudios previos [30] [31] han demostrado que, para la mayoría de los propósitos, la variabilidad de la resistencia del concreto en la compresión puede representarse por una distribución normal si el coeficiente de variación no excede el 15-20%, aunque generalmente hay una ligera asimetría.

Campbell menciona que en los casos en que el coeficiente de variación es muy alto, la asimetría tiende a ser considerable, y una función logarítmica normal representa las áreas de la cola de la distribución de manera más razonable [32].

La mayoría de los investigadores han usado una distribución normal debido a su simplicidad y porque el área central de la curva es más importante en el control del concreto [33]. Para el concreto producido en una operación comercial, Rojas-Henao en el 2012 encontró que la diferencia entre la distribución de Weibull y la distribución normal no es lo suficientemente grande como para hacer una distinción clara con respecto a qué distribuciones definitivamente son mejores

con los datos experimentales. Sin embargo, la investigación sobre la variabilidad de la resistencia a la compresión de los núcleos de concreto en sitio rara vez es limitada [34].

La forma común de determinar la resistencia en sitio del concreto es perforar y probar núcleos [35]. Otros autores mencionan que, aunque el método consiste en operaciones costosas y que requieren mucho tiempo, los núcleos proporcionan resultados confiables y útiles porque se someten a pruebas mecánicas para su destrucción. Véase Figura 14 [36]. Los problemas generales de las pruebas del núcleo son muy conocidos, y los factores que influyen en la relación entre la resistencia del núcleo y la resistencia estándar del cubo o del cilindro han sido informados por muchos investigadores [37], [38], [39], [40] y [41].



Figura 14. Ensayo de un núcleo de concreto en ejecución.

Los procedimientos recomendados para el corte, la prueba y la interpretación de los resultados están totalmente establecidos y documentados por diferentes códigos estándar, como ASTM C 42 [42].

2.3. Método de Madurez.

2.3.1. *Antecedentes del método de madurez*

En 1949 McIntosh mencionó por primera vez la idea de que el incremento de la ganancia de la resistencia del concreto se basa en el tiempo de curado y la historia de la temperatura, el mencionó en su hipótesis que la "velocidad del endurecimiento en cualquier momento es directamente proporcional a la cantidad en que la temperatura de curado supera la temperatura (de referencia)". McIntosh definió este índice de endurecimiento como "edad básica". La temperatura de referencia se definió como la temperatura por debajo de la cual el concreto no se endurece, McIntosh eligió este dato de temperatura como -1°C (30°F) [43].

En esa misma fecha Nurse publicó los hallazgos de sus investigaciones sobre los efectos del curado a vapor en concreto. En su estudio, Nurse curó diferentes mezclas de concreto a temperaturas que van desde 18°C a 100°C (64°F a 212°F) y probó la resistencia a la compresión varias veces en diferentes intervalos de tiempo. Con el fin de comparar los efectos del tiempo y la temperatura en la

resistencia a la compresión de las diferentes mezclas evaluadas, Nurse expresó las resistencias "como un porcentaje de la resistencia después de 3 días de almacenamiento en condiciones de temperatura normal 18°C (64°F)".

Más tarde, en un seguimiento de los hallazgos de Nurse, Saul en 1951 definió la madurez del concreto como "su edad multiplicada por la temperatura promedio por encima del punto de congelación que ha mantenido ". Con la combinación del producto de tiempo-temperatura de Nurse y la definición de madurez de Saul, nació la primera función de madurez. La función de Madurez de Nurse-Saul [44]:

$$M(t) = \sum_0^t (Ta - T_0) \Delta t$$

Ecuación 18

Donde:

$M(t)$ = índice de madurez, °C-horas

Δt = Intervalo de tiempo, horas

Ta = Temperatura promedio del concreto, °C, durante un intervalo de tiempo Δt

T_0 = Temperatura de referencia o dato de temperatura, °C.

Saul sugirió usar $T_0 = 0^\circ\text{C}$ (32°F), pero mencionó usar una temperatura de referencia más baja si el concreto estará sujeto a temperaturas más bajas después del fraguado.

En 1977 otra función fue introducida por Freiesleben Hansen y Pedersen y se conoce como la función de madurez de Arrhenius [45]. El índice de madurez que produce esta función se llama edad equivalente y está representada por:

$$t_e = \sum_0^t e^{-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right)} \cdot \Delta t$$

Ecuación 19

Donde:

t_e = Edad equivalente a una temperatura de referencia, T_s , horas.

E = Energía de activación J/mol

R = Constante universal de los gases ideales, 8.314 J/mol·K

T_a = Temperatura promedio del concreto, °K, durante un intervalo de tiempo Δt

T_s = Temperatura de referencia, °K

Δt = Intervalo de tiempo, horas

Carino mencionó que la energía de activación en la Ecuación 19 necesita ser definida, y debe ser seleccionada para caracterizar la sensibilidad a la temperatura de la mezcla. Tiene que ver con la energía requerida para comenzar el proceso de endurecimiento de una mezcla particular [6].

Al pasar de los años se han propuesto modificaciones para la función de madurez de Nurse-Saul para obtener mejores estimaciones de la resistencia a la

compresión del concreto curado a diferentes temperaturas [46]. Y. A. Abdel-Jawad en el 2001 propusieron modificaciones en las que toman en cuenta el efecto de la relación a/c sobre el desarrollo de la resistencia y el efecto de la temperatura de curado en resistencias a largo plazo. El efecto de las modificaciones usando la función de madurez de Nurse-Saul (NSM) se han comparado con la estimación de la resistencia usando la ecuación (NSM) no modificada con dos diferentes temperaturas de referencia ($T_0 = -10^{\circ}\text{C}$ y $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$). se encontró que la aplicación de las modificaciones propuestas mejora la exactitud de la resistencia estimada del concreto a diferentes temperaturas de curado, especialmente en edades posteriores [47].

Así mismo Liao y Lee en el 2008 determinaron el desarrollo de la resistencia a edad temprana del concreto mediante el método de madurez que considera no sólo la historia de la temperatura de curado en el núcleo de los especímenes de concreto, sino también, la humedad relativa del ambiente y se realizaron ensayos de compresión sobre cilindros de concreto curados en diferentes condiciones de temperatura y humedad, además, se han utilizado programas de verificación para determinar la aplicabilidad del modelo de predicción capaz de predecir el desarrollo de la resistencia en sitio de los cilindros de concreto ordinarios a edades tempranas con una diferencia máxima de 10% [48].

En un estudio reciente T. A. Yikici y Chen en el 2015 emplearon el método de madurez para predecir la resistencia a la compresión en sitio de una masa de concreto en bloques de 6 pies cúbicos en diferentes ubicaciones alrededor del cubo. Además, obtuvieron las energías de activación de los cuatro bloques de mezclas de concreto para determinar la madurez. Se hicieron curvas de desarrollo de resistencia de acuerdo con la ASTM C1074 [49] para estas mezclas de concreto usando muestras cilíndricas de 15 por 30 cm (6 por 12 in) en sitio. También, se embebieron sensores de temperatura a lo largo de la profundidad de los cubos para monitorear las historias de temperatura hasta 28 días. Se extrajeron núcleos de 10 cm (4 in) de diámetro, con 1.8 m de longitud de los cubos a 4, 28 y 56 días y las resistencias del núcleo se compararon con las resistencias predichas usando las funciones de madurez y concluyeron que la resistencia predicha del concreto en el lugar es siempre mayor que la resistencia real del núcleo en las ubicaciones de la superficie superior del cubo. Los resultados de resistencia a compresión de núcleos de la sección media estaban dentro de $\pm 15\%$ de los valores predichos y los resultados del núcleo de la sección inferior fueron mayores que los previstos [50].

Benaicha en su proyecto de investigación los principales objetivos de este estudio fueron: (1) estudiar la evolución de la temperatura de cuatro tipos de concreto, como el concreto autocompactante, el concreto de alto rendimiento y el concreto reforzado con fibras sintéticas o metálicas de alto rendimiento; y (2) estudiar la evolución de la resistencia mecánica en función del endurecimiento por el método de madures y la temperatura de curado. Basado en la curva de

referencia de resistencia mecánica a 20 °C de estos cuatro tipos de concreto estudiados, el objetivo final fue caracterizar la resistencia en el sitio como una función de la edad equivalente de 5 horas después del colado del concreto los resultados sirvieron para mostrar el desarrollo de cada resistencia de cada concreto en estudio y concluyeron que el método de madurez es un método fácil, económico y efectivo para obtener la resistencia a edad temprana [51].

Recientemente en la ciudad de México se llevó a cabo un proyecto de investigación para caracterizar tanto el fraguado como el endurecimiento de tres mezclas de concreto autocompactables de alta resistencia utilizadas en la producción de pilotes y columnas combinadas prefabricadas (zapatas de columnas) del segundo piso del periférico de la Ciudad de México. Al monitorear una base de la columna de 18 metros de altura durante su elaboración, se registró el amplio rango de temperaturas internas del concreto que experimentó esta estructura masiva a una edad temprana, de 5 a 90 ° C. El método de madurez del concreto se aplicó a en morteros equivalentes de acuerdo a la norma ASTM C1074-11. El análisis de los resultados experimentales permitió la validación estadística de nuevas funciones de madurez para las mezclas de mortero equivalentes, lo que proporcionó mejores predicciones para la resistencia relativa que el procedimiento de ASTM C1074-11 para las edades del concreto y a amplios rangos de temperaturas de curado probadas. Las funciones de madurez mostraron el efecto cruzado, es decir, la influencia de la temperatura interna experimentada por el concreto en su resistencia a la compresión a largo plazo [52].

CAPITULO 3

3. Estado del arte.

3.1. Métodos para la estimación de la resistencia a la compresión del concreto en el lugar

Las pruebas en el lugar para determinar las propiedades del concreto se realizan después de su colocación en la cimbra; generalmente cuando este se encuentra en estado endurecido, estas pruebas a diferencia de los ensayos típicos que realizan en especímenes moldeados del mismo concreto que el de la estructura, evalúan las propiedades con las condiciones ambientales reales a las que fue sometido el elemento [53]. Durante la historia se les ha denominado pruebas no destructivas (NDT) porque algunas de las primeras pruebas no dañaron el concreto, sin embargo, a través del tiempo, han surgido nuevos métodos que dan como resultado daños locales superficiales. Por lo tanto, la terminología “pruebas en sitio” se usa como una categoría general que incluye aquellas pruebas que no alteran al concreto y aquellas que resulten en daños superficiales menores. La principal característica de estas pruebas es que pueden medir propiedades del concreto en una estructura. Para este presente trabajo, la característica principal que tomaremos en cuenta al aplicar las pruebas en sitio es la estimación de la resistencia a la compresión del concreto.

Las pruebas en el lugar se pueden usar para estimar la resistencia del concreto durante la construcción, de modo que las operaciones se pueden

realizar de manera segura o se pueden terminar los procedimientos de curado. También se pueden usar para estimar la resistencia del concreto durante la evaluación de las estructuras existentes. Estas dos aplicaciones requieren enfoques ligeramente diferentes [54].

Para hacer una estimación de la resistencia, es necesario tener una relación conocida entre el resultado de la prueba en sitio y la resistencia del concreto. Para la construcción nueva, esta relación generalmente se establece empíricamente en el laboratorio. Para estructuras existentes, la relación generalmente se establece realizando pruebas in situ en lugares seleccionados de la estructura y determinando la resistencia de los núcleos extraídos desde ubicaciones adyacentes [19].

La precisión de la estimación de resistencia depende del grado de correlación entre la resistencia del concreto y la resistencia medida por la prueba en el lugar. El usuario de las pruebas en el lugar debe comprender qué propiedad se mide con la prueba y cómo se relaciona esta propiedad con la resistencia del concreto [19].

3.1.1. Métodos de pruebas no destructivas

3.1.2. Métodos de dureza superficial

3.1.2.1. Método de rebote

El esclerómetro o martillo de rebote Schmidt es un probador de dureza superficial del concreto principalmente con poca relación teórica aparente entre la resistencia del concreto y el número de rebote del martillo. Sin embargo, dentro de ciertos límites, se han establecido correlaciones empíricas entre las propiedades de resistencia y el número de rebote [2].

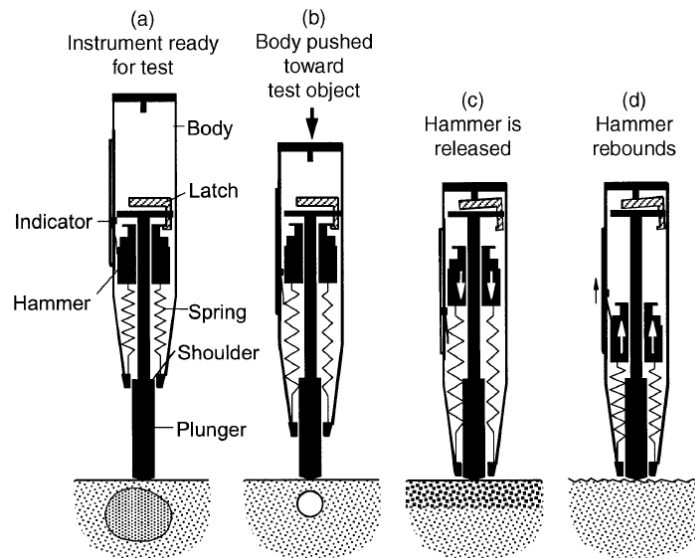


Figura 15. Esquema ilustrativo del funcionamiento del martillo de rebote.

El martillo de rebote mostrado en la figura 1 consiste principalmente de los siguientes componentes:

- 1) cuerpo externo
- 2) embolo
- 3) martillo

4) resorte

Para realizar la prueba, el émbolo se extiende desde el cuerpo del instrumento y se pone en contacto con la superficie de concreto. Cuando el émbolo se extiende, un mecanismo de bloqueo bloquea el martillo en el extremo superior del émbolo. El cuerpo del instrumento se empuja hacia el miembro de concreto. Esta acción causa una extensión del resorte que conecta el martillo al cuerpo (Figura 1. (b)). Cuando el cuerpo se empuja al límite, el seguro se libera automáticamente, y la energía almacenada en el resorte impulsa la masa del martillo hacia la punta del émbolo (Figura 1. (c)). El martillo impacta el área del hombro del émbolo y rebota (Figura 1. (d)). El martillo de rebote mueve el indicador de deslizamiento que registra la distancia de rebote. La distancia de rebote se mide en una escala numerada de 10 a 100 y se registra como el número de rebote [19], [2].

La prueba se puede realizar de forma horizontal, vertical hacia arriba o hacia abajo, o en cualquier ángulo intermedio. Debido a los diferentes efectos de la gravedad en el rebote a medida que se cambia el ángulo de prueba, el número de rebote será diferente para el mismo concreto y requerirá tablas de calibración o de corrección separadas.

ASTM estándar C 805 "Método de prueba estándar para el número de rebote de concreto endurecido" [55], se emitió por primera vez como un método de prueba tentativo en 1975 y se adoptó como método de prueba estándar en 1979. El método de prueba se ha revisado periódicamente.

3.1.2.1.1. Limitaciones

El martillo de rebote brinda una alternativa rápida y económica para verificar la uniformidad del concreto, pero, tiene serias limitaciones que se deben tomar en cuenta. Los resultados del martillo de rebote Schmidt se ven afectados por:

- Suavidad de la superficie de prueba
- Tamaño, forma y rigidez de los especímenes
- Edad de los especímenes de prueba
- Condiciones de humedad interna y de superficie del concreto
- Tipo de agregado grueso
- Tipo de cemento
- Tipo de molde
- Carbonatación de la superficie de concreto

La estimación de la resistencia del concreto mediante el martillo de rebote dentro de una precisión de ± 15 a $\pm 20\%$ solo puede ser posible para las probetas moldeadas, curadas y probadas en condiciones similares a aquellas a partir de las cuales se establecen las curvas de correlación [2].

3.1.3. Métodos de resistencia a la penetración

Los métodos de resistencia a la penetración se basan principalmente en la determinación de la profundidad de penetración de las sondas en el concreto. Esto brinda una medida de la dureza o resistencia a la penetración del material que puede estar relacionada con su resistencia.

3.1.3.1. Sonda de Windsor

Entre 1964 y 1966 se creó un dispositivo conocido como la sonda Windsor para la prueba de penetración de concreto tanto en el laboratorio como en sitio. El dispositivo fue diseñado para estimar la calidad y la resistencia a la compresión del concreto en sitio midiendo la profundidad de penetración de las sondas impulsadas al concreto por medio de un controlador accionado por pólvora (Figura 2.), además consiste en sondas de aleación de acero endurecido, cartuchos cargados y un medidor de profundidad para medir la penetración de las sondas.

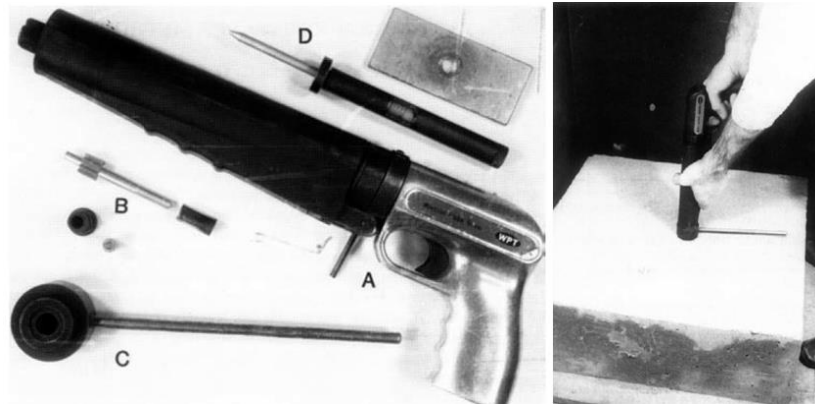


Figura 16. Equipo de sonda de Windsor en operación.

No hay un análisis teórico riguroso de la prueba de penetración de la sonda disponible. Tal análisis puede, de hecho, no ser fácil de lograr en vista de las complejas combinaciones de tensiones dinámicas desarrolladas durante la penetración de la sonda, y la naturaleza heterogénea del concreto. La prueba implica una cantidad inicial dada de energía cinética de la sonda, que se absorbe durante la penetración, en gran parte mediante la trituración y fracturación del concreto, y en menor medida mediante la fricción entre la sonda y el concreto.

La penetración de la sonda hace que el concreto se fracture dentro de una zona con forma de cono debajo de la superficie con grietas que se propagan hacia la superficie (Figura 16.) La penetración adicional por debajo de esta zona es, en gran parte, resistida por la compresión del material adyacente, y se ha encontrado que la prueba de la sonda Windsor mide la compresibilidad de un área localizada de concreto mediante la creación de un bulbo de compactación

subsuperficial. Además, se ha afirmado que la energía requerida para romper piezas de agregado es un bajo porcentaje de la energía total de la sonda impulsada, y la profundidad de penetración no se ve afectada significativamente [2].

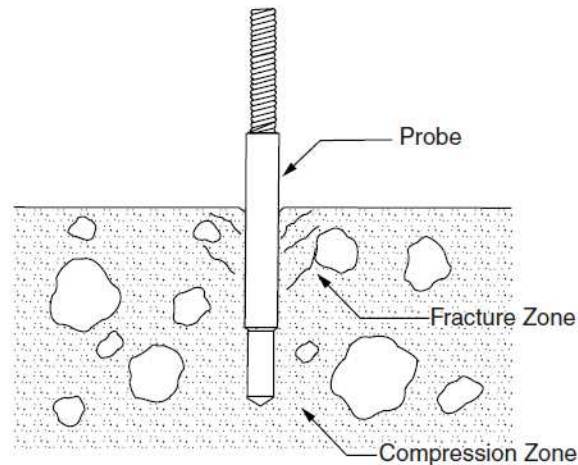


Figura 17. Ilustración de la penetración de la sonda en el concreto.

3.2. Ensayos de extracción (Pull-out)

La prueba de extracción es un método de prueba semi-destructivo que involucra la extracción de un inserto que ha sido embebido en la estructura (Figura 18). A partir de la fuerza requerida para extraer el inserto, se puede determinar una estimación de la resistencia a la compresión creando una correlación entre la fuerza de extracción y la resistencia a la compresión del concreto [56].



Figura 18. Tipos de insertos: A) Inserto flotante y B) inserto para cimbra.

Una de las grandes ventajas que tiene la prueba de extracción es que se logra obtener una estimación precisa de la resistencia del concreto en el lugar. El efecto real de las condiciones de curado y construcción en la resistencia del

concreto que se encuentra en la estructura se prueba cuando se utiliza la prueba de extracción. La prueba de extracción es un método eficiente para probar la resistencia del concreto en el lugar para que los procesos críticos de construcción puedan continuar. Otra de las ventajas es que la prueba de extracción no requiere concreto adicional ni hacer cilindros en campo y el equipo utilizado para realizar la prueba mostrado en la es simple de operar, relativamente liviano y portátil [57].



Figura 19. Equipo de extracción empleado.

3.2.1. Principio del funcionamiento de la prueba

Tal y como se logra apreciar en la Figura 20, se trata de un disco de acero, con un diámetro de 25 mm, que se instala a una profundidad de 25 mm, y que

luego se extrae concéntricamente, ejerciendo fuerza contra un anillo de 55 mm de diámetro, en contrapresión, apoyándose en la superficie de la zona de estimación. El concreto entre el disco y el anillo de contrapresión se encuentra sometido a esfuerzos de compresión pura. En este caso se puede obtener la fuerza “F” requerida para extraer el inserto, que es una medida asociada a la resistencia última a la compresión del concreto [58]. El ensayo se puede realizar entonces, ya sea para verificar una carga requerida, caso en el cual la prueba no es destructiva, o para determinar la carga máxima; la cual resulta en una pequeña falla cónica de aproximadamente 55 mm en la superficie (Véase Figura 21), y que como antes se comentó, es una medida asociada a la capacidad máxima a la compresión del material [59] .

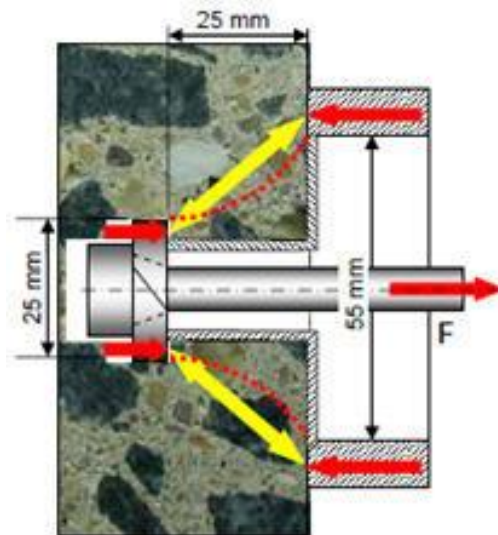


Figura 20. Esquema del principio del funcionamiento de la prueba LOK-TEST.



Figura 21. Falla cónica resultante de la prueba LOK-TEST.

3.2.2. Aplicación de la prueba de extracción (Pull-Out)

El Comité 228 de ACI [19] recomienda varios métodos para estimar la correlación entre la prueba de extracción y la resistencia a la compresión en el laboratorio (ACI 228.1R 2003). La primera es instalar un inserto extraíble en la parte inferior de un cilindro de 15 x 30 cm (6 x 12 in) y luego ensayar los cilindros en compresión [17]. La prueba de extracción se detiene en la carga final, y el inserto no se extrae completamente, de modo que el cilindro se puede tapar y luego probar a compresión.

Otro método consiste en moldear un conjunto de cilindros que fallen por compresión y moldear un conjunto de cilindros con insertos embebidos en la parte

inferior solo para usarse durante la prueba de extracción. Ambos conjuntos se prueban simultáneamente para obtener una fuerza de extracción y una resistencia a la compresión. Sin embargo, se han desarrollado problemas al usar la extracción embebida en un cilindro de 15 x 30 cm (6 x 12 in). Cuando se prueba el inserto de extracción, se puede producir un agrietamiento radial, lo que hace que la fuerza de extracción final disminuya.

Un método diferente, que minimiza el agrietamiento radial, es hacer cubos de concreto con insertos en las caras del cubo. El tamaño mínimo recomendado de los cubos es de 20 cm (8 in) cuando se usa un inserto con una profundidad de empotramiento de 25 mm (1 in.) [19]. En cada pared vertical, se puede colocar un inserto en el centro de manera que se puedan probar un total de cuatro insertos en un cubo tal y como se muestra en la Figura 22). Los cubos se fabrican junto con cilindros para comparar la fuerza de extracción con la resistencia a la compresión. Siempre que la compactación sea consecuente entre los cilindros y los cubos, la prueba debe ser consistente en la comparación de las resistencias finales de la extracción con la resistencia a la compresión.



Figura 22. Molde para obtener las correlaciones de acuerdo al ACI 228.

3.2.3. Evaluación de estructuras nuevas

Tradicionalmente en la prueba “Pull-out”, el inserto metálico para estructuras nuevas, está equipado con diversos aditamentos dependiendo de su aplicación. En superficies verticales o partes inferiores de elementos estructurales, el inserto metálico se fija a la cimbra Figura 23 A). Una vez que el inserto esté correctamente fijado a la cimbra y se encuentra completamente libre de movimientos producidos por los procesos en la ejecución de la construcción, se cuela el concreto. El tiempo de extracción dependerá de la edad en que se requiera conocer la resistencia del concreto, pero en general, puede ser antes o después de retirar la cimbra. Es común que se dejen 3 insertos en una misma zona, para llevar a cabo la prueba a la edad que se desee evaluar la estructura.

Es común que esta prueba se realice para evaluar el tiempo de descimbrado en función de la madurez que vaya adquiriendo el concreto (inserto de descimbrado temprano). En el caso de las losas de concreto o de superficies horizontales, se usan los llamados insertos “flotantes”, que se instalan en el concreto en estado fresco mostrado en la Figura 23 B) [60].

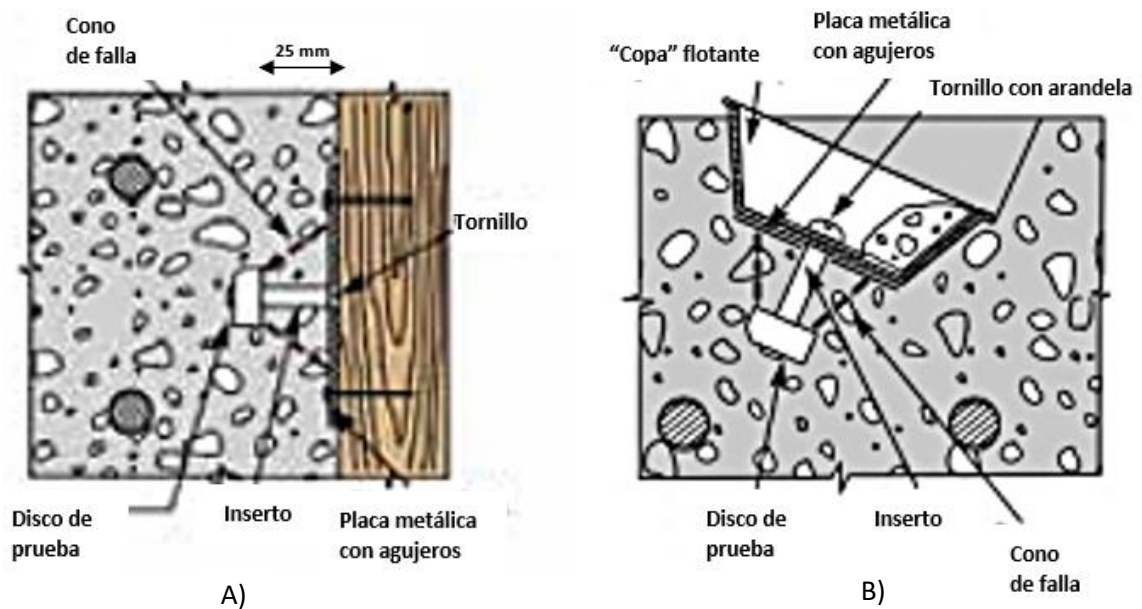


Figura 23. A) Inserto colocado directamente en la cimbra, B) Inserto flotante de descimbrado temprano.

3.2.4. Características estadísticas

Existen dos características estadísticas importantes de las pruebas para obtener la resistencia del concreto en el lugar, como la prueba de extracción, son

la variabilidad dentro de la prueba y la relación (correlación) entre los resultados de la prueba y la resistencia a la compresión. La variabilidad dentro de la prueba, también llamada "repetibilidad", se refiere a la dispersión de los resultados cuando la prueba se repite en concreto idéntico utilizando el mismo equipo, procedimientos y personal de prueba. Para un concreto dado, la repetibilidad de una prueba afecta el número de pruebas requeridas para establecer, con un grado de certeza deseado, el valor promedio de la propiedad que se mide por la prueba. La relación es necesaria para convertir los resultados de la prueba a valor de resistencia a la compresión [11].

3.3. Desarrollo del método de madurez

3.3.1. Introducción

El método de madurez es una manera simple y efectiva de estimar las resistencias del concreto a edades tempranas. El concepto de madurez se desarrolló en Inglaterra durante la década de 1950, cuando los investigadores estudiaban los efectos del tiempo y la temperatura en el desarrollo de la resistencia del concreto endurecido. Ahora se ha convertido en una teoría ampliamente utilizada para estimar la resistencia del concreto en edades tempranas.

Como es bien sabido, la resistencia de una mezcla de concreto dada, que se ha colocado, compactado y curado adecuadamente, es una función de su historial de edad y temperatura. A edades tempranas, la temperatura tiene un efecto drástico en el desarrollo de la resistencia. Esta dependencia de la temperatura presenta problemas al tratar de estimar la resistencia en el lugar en función de los datos de desarrollo de la resistencia obtenidos en condiciones de laboratorio estándar [61] .

Alrededor de 1950, se propuso un enfoque para explicar los efectos combinados del tiempo y la temperatura en el desarrollo de la resistencia del concreto. La motivación fue la necesidad de un método para estimar los efectos de los tratamientos de curado con vapor en el desarrollo de la resistencia. Posteriormente, la aplicación del método se extendió a las condiciones de curado ordinarias. Se propuso que el historial de temperatura medido durante el período de curado podría usarse para calcular un solo número que sería indicativo de la resistencia del concreto. Saul llamó a este único factor “madurez” y propuso la conocida “regla de madurez” para estimar la resistencia del concreto [62].

Tras la publicación de la regla de madurez, hubo informes de su validez. Sin embargo, hubo informes de casos en los que el método falló desde el momento de la propuesta inicial, se han llevado a cabo investigaciones exhaustivas y se han realizado modificaciones para mejorar la precisión de la resistencia estimada a partir del historial de temperatura [63]. Hoy en día, el método de madurez se ve como un medio útil y simple para tratar de explicar los efectos complejos del

tiempo y la temperatura en el desarrollo de la resistencia. El método se utiliza durante el período de curado y no es aplicable a las estructuras de concreto existentes.

3.3.2. Definición del método

La ganancia de resistencia de una mezcla de concreto es una función de su historial de edad y temperatura, siempre que el concreto se coloque, consolide y cure adecuadamente [11]. Los efectos de la temperatura durante las edades tempranas del proceso de curado del concreto tienen un impacto importante en el desarrollo de la resistencia del concreto [64].

Por lo tanto, puede ser difícil estimar el desarrollo de la resistencia en el lugar del concreto a partir de los datos de resistencia recolectados de especímenes curados en condiciones constantes [11]. En consecuencia, la necesidad de una estimación de la resistencia en el lugar del concreto utilizando el historial de tiempo y temperatura del concreto es esencial. Este método se conoce como el método de madurez.

La madurez es "el grado de desarrollo de las propiedades de una mezcla cementosa" [49]. En otras palabras, la madurez es el desarrollo de las propiedades físicas del concreto a medida que avanza el proceso de hidratación.

Para cuantificar un valor de madurez, existen múltiples funciones para calcular el "índice de madurez" del concreto.

Existen dos funciones de madurez que recomienda ASTM C 1074 y son la función de madurez Nurse-Saul y la función de madurez de Arrhenius. El índice de madurez es "un indicador de madurez que se calcula a partir del historial de temperatura de la mezcla cementosa mediante el uso de una función de madurez" [49].

Saul (1951) escribió la "regla de la madurez", afirmando que:

“Muestras de una misma mezcla de concreto tendrán iguales resistencias si es que tienen iguales valores de madurez, aunque el historial de temperaturas varíe en el transcurso del tiempo”

El concepto del método de madurez se puede usar para cuantificar el desarrollo de la resistencia de una mezcla de concreto en particular. Por lo tanto, si el concreto se cura en condiciones frías o calientes, la madurez debe ser la misma y la resistencia del concreto se puede estimar con precisión. En la Figura 24 se muestra una ilustración del método de madurez para el concreto curado a temperaturas frías y calientes. Si las temperaturas de curado son frías, entonces el tiempo para alcanzar una madurez será mayor que si las temperaturas de

curado son altas. Mientras se alcance la misma madurez para ambas condiciones de curado, su resistencia debe ser la misma, como se muestra en la Figura 24.

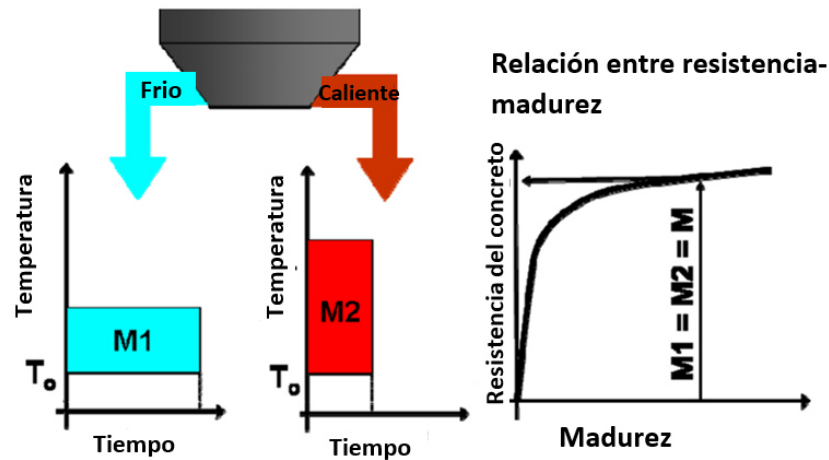


Figura 24.Efecto de los historiales de temperatura en el cálculo de la madurez.

Con el fin de desarrollar la relación resistencia-madurez, múltiples tareas deben llevarse a cabo de forma simultánea en la mezcla de concreto. Primero, se deben realizar pruebas para evaluar el desarrollo de la resistencia y el historial de temperatura de una mezcla de concreto. Para hacer esto, se realizan múltiples muestras y luego se someten a pruebas de resistencia a la compresión a diferentes edades. Además, la temperatura se registra instalando un dispositivo de medición cuando el concreto todavía está en un estado fresco. Las pruebas de resistencia pueden realizarse utilizando varios métodos de prueba. Los dos métodos de prueba comunes son la prueba de compresión de cilindros de

concreto y vigas de concreto ensayadas a flexión. Cuando se realizan pruebas de resistencia, se debe registrar la madurez del concreto.

Para registrar la madurez del concreto, se deben recopilar los datos del historial temperatura y calcular el índice de madurez para el momento en que se realizó la prueba de resistencia. Después de que se hayan recopilado todos los datos de resistencia y se haya calculado el índice de madurez para cada edad de prueba del concreto, se puede desarrollar la relación resistencia-madurez.

3.3.3. Función de madurez Nurse-Saul

La función de madurez de Nurse-Saul fue propuesta originalmente por Nurse y Saul en 1951, utiliza la función tiempo temperatura (TTF) como índice de madurez. Debido a su simplicidad y predicción de resistencia bastante precisa, muchos investigadores han recomendado el uso de esta función de madurez [51], [65], [66]. La Ecuación 18 muestra el cálculo de TTF utilizando el historial de temperatura del concreto en la función de madurez de Nurse-Saul (NSM).

$$M(t) = \sum_0^t (T_a - T_0) \Delta t$$

Ecuación 20

Donde:

$M(t)$ = índice de madurez, °C-horas

Δt = Intervalo de tiempo, horas

T_a = Temperatura promedio del concreto, °C, durante un intervalo de tiempo Δt

T_0 = Temperatura de referencia o dato de temperatura, °C.

La función de madurez de Nurse-Saul es la suma de la temperatura promedio para el intervalo de tiempo menos la temperatura de referencia multiplicada por el intervalo de tiempo de interés. En la Ecuación 18, se puede ver un esquema de la función de madurez de Nurse-Saul de madurez de Nurse-Saul. El historial de temperatura del concreto se muestra con la línea curva, mientras que el índice de madurez de Nurse-Saul para cada intervalo de tiempo se acumula en los bloques rectangulares sombreadados [67].

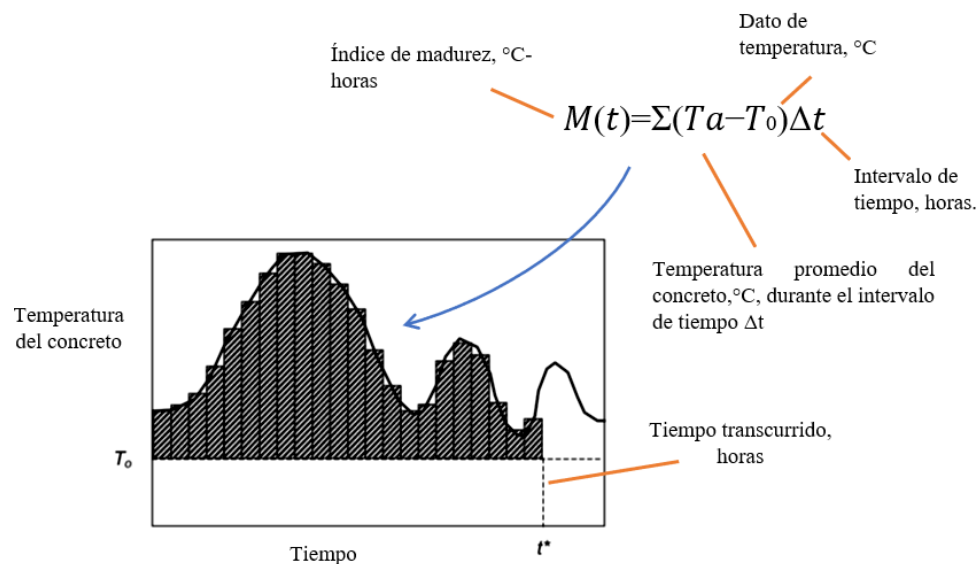


Figura 25. Esquema del historial de temperatura y factor temperatura-tiempo estimado de acuerdo con la Ecuación 18.

3.3.3.1. *Valores típicos de temperatura de referencia (T_0)*

Saul en 1951 explicó que la temperatura de referencia debería ser la temperatura más baja a la que el concreto deja de ganar resistencia y recomendó una temperatura de referencia de -10.5°C (13.1°F) [62]. Más adelante en un estudio de Plowman, se encontró que -12°C (10.4°F) era la temperatura a la cual el concreto deja de ganar resistencia [68]. En general, se utiliza una temperatura de referencia de -10°C (14°F) propuesta por Carino en 1991 [11], pero, la norma ASTM C 1074 [49] recomienda una temperatura de referencia de 0°C (32°F) para el cemento tipo I sin aditivos y cuando la temperatura de curado permanece entre 0 y 40°C (32 a 104°F).

Carino y Tank en 1992 realizaron un estudio en el que probaron concreto y muestras de mortero curadas a diferentes temperaturas. Las muestras se mezclaron con diferentes cementantes y dos relaciones a/c. En este estudio, tres conjuntos de muestras se curaron a 10 , 32 y 40°C (50 , 73 y 104°F) y luego se sometieron a pruebas de resistencia a intervalos regulares. La tabla 3 muestra un resumen con las mejores temperaturas de referencia [69]:

Tabla 3. Valores de temperatura de referencia propuestos por Carino y Tank [69].

Tipo de cemento	Dato de temperatura [°C (°F)]			
	a/c = 0.45		a/c= 0.6	
	Concreto	Mortero	Concreto	Mortero
Tipo I	11 (52)	11 (52)	9 (48)	7 (45)
Tipo II	9 (48)	9 (48)	6 (43)	5 (41)
Tipo III	7 (45)	6 (43)	7 (45)	6 (43)
Tipo I + 20% de ceniza volante	-5 (23)	-2 (28)	0 (32)	3 (37)
Tipo I + 50% de escoria	8 (46)	7 (45)	10 (50)	9 (48)
Tipo I + Acelerante	8 (46)	10 (50)	9 (48)	9 (48)
Tipo I + Retardante	5 (41)	6 (43)	5 (41)	2 (36)

3.3.4. Función de madurez de Arrhenius

En 1977, Freiesleben Hansen y Pedersen propusieron una nueva función para calcular un índice de madurez a partir del historial de temperatura registrado del concreto [45]. Esta función se basó en la ecuación de Arrhenius que se usa para describir el efecto de la temperatura en la velocidad de una reacción. La nueva función permitió el cálculo de la edad equivalente del concreto, tal función se muestra en la Ecuación 19 de la siguiente manera:

$$t_e = \sum_0^t e^{-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right)} \cdot \Delta t$$

Ecuación 21

Donde:

t_e = Edad equivalente a una temperatura de referencia, T_s , horas.

E = Energía de activación J/mol

R = Constante universal de los gases ideales, 8.314 J/mol·K

T_a = Temperatura promedio del concreto, °K, durante un intervalo de tiempo Δt

T_s = Temperatura de referencia, °K

Δt = Intervalo de tiempo, horas

Usando la Ecuación 19, la edad real del concreto se convierte a su edad equivalente, en términos de ganancia de resistencia, a la temperatura de referencia. En la práctica europea, la temperatura de referencia generalmente se toma como 20 ° C, mientras que en la práctica norteamericana se toma generalmente como 23 ° C. La introducción de esta función superó una de las principales limitaciones de la función Nurse Saul porque permitió una relación no lineal entre la velocidad inicial de desarrollo de la resistencia y la temperatura de curado (Véase Figura 26). Esta dependencia de la temperatura se describe mediante el valor de la energía de activación aparente, E_a .

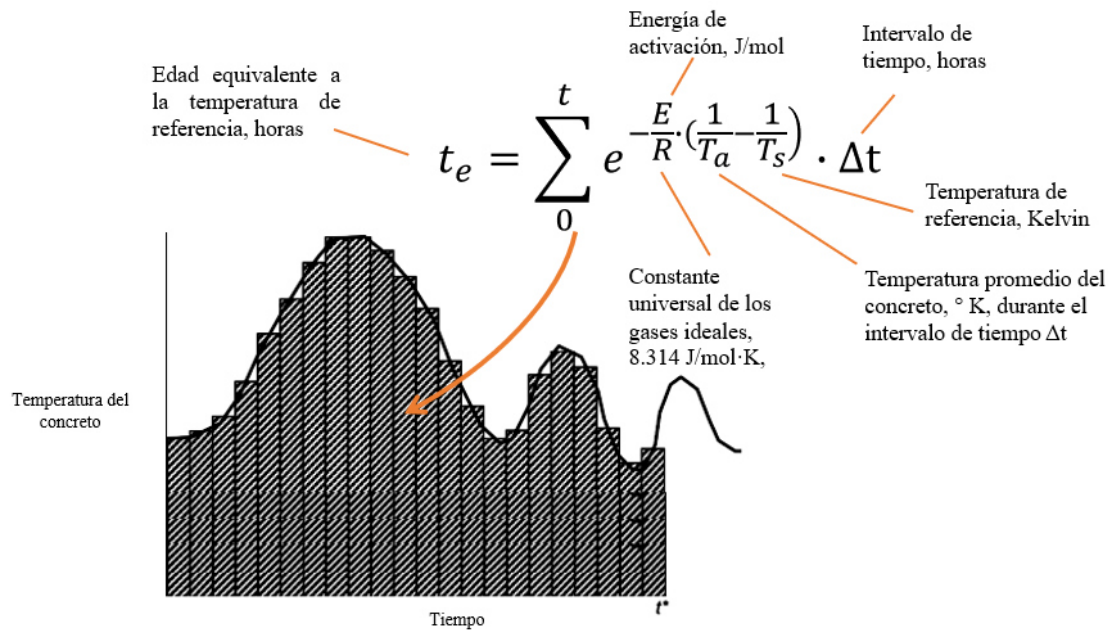


Figura 26. Esquema que muestra el comportamiento de la ecuación de arrhenius.

Los estudios comparativos mostraron que esta nueva función de madurez es superior a la función de Nurse-Saul [70], [71]. El uso de la Ecuación 19 eliminó en gran medida las discrepancias entre las relaciones de resistencia y madurez desarrolladas con diferentes temperaturas de curado iniciales, es decir, eliminó la discrepancia en la madurez temprana mostrada en la Figura 27 a través del “efecto cruzado”. Sin embargo, la nueva función no puede explicar los efectos de temperatura de la edad temprana en la resistencia. Esta es una limitación inherente del método de madurez [67].

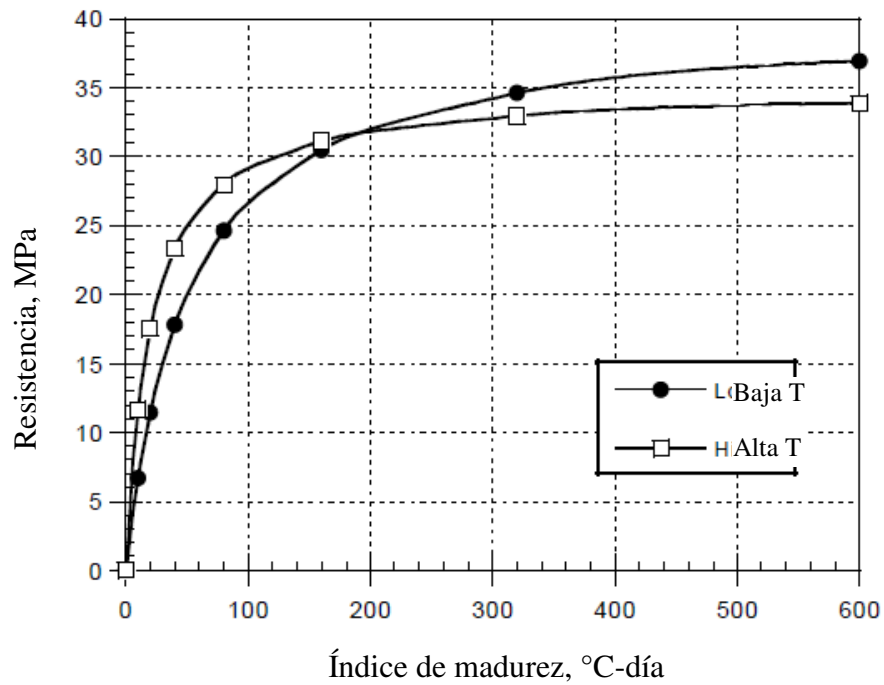


Figura 27. El "efecto cruzado" debido a la diferente temperatura del concreto a edad temprana durante el desarrollo de la relación de resistencia-madurez.

3.3.4.1. Valores típicos de energía de activación (E_a)

Tabla 4. Valores de energía activación propuestas por Carino y Tank [69].

Tipo de cemento	Dato de temperatura [°C (°F)]			
	a/c = 0.45		a/c= 0.6	
	Concreto	Mortero	Concreto	Mortero
Tipo I	63,000	61,100	48,000	43,600
Tipo II	51,100	55,400	42,700	41,100
Tipo III	43,000	40,100	44,000	42,600
Tipo I + 20% de ceniza volante	30,000	33,100	31,200	36,600
Tipo I + 50% de escoria	44,700	42,700	56,000	51,300
Tipo I + Acelerante	44,600	54,900	50,200	52,100
Tipo I + Retardante	38,700	41,900	38,700	34,100

La misma investigación de Carino y Tank que se usó para determinar el T_0 , también se usó para encontrar las energías de activación (E_a) más adecuadas para cada una de las mezclas de concreto evaluada. En base a estos resultados, Carino y Tank concluyeron que la energía de activación para una mezcla de concreto podría obtenerse a partir de los datos de ganancia de resistencia de los cubos de mortero [69].

Recientemente, en la investigación de Michelle R. Nokken 2016 comparó la energía de activación obtenida por cuatro métodos y los comparó con los valores de la literatura. Y concluyó que los procedimientos sugeridos en el Anexo A1 de ASTM C1074 para determinar la energía de activación se pueden utilizar de igual

manera y menciona que se debe tener cuidado en las comparaciones con los valores determinados por la resistencia a la compresión, ya que los resultados son diferentes.

3.3.5. Limitaciones del método de madurez

En base a los estudios anteriores realizados por otros investigadores, algunos factores que afectan la hidratación del concreto, como la temperatura de curado, la humedad del curado y las propiedades del concreto fresco, causan una predicción inexacta de la resistencia de la madurez [72].

3.3.6. Funciones para modelar la relación de resistencia-madurez

Con el fin de predecir la resistencia del concreto precisa utilizando el método de la madurez, es importante desarrollar curvas de resistencia-madurez apropiadas que muestran una tendencia idéntica con la resistencia real en comparación con diagramas del índice de madurez [72]. La norma ASTM C 1074 establece que cada diseño de mezcla de concreto tiene una relación única de resistencia-madurez, y se requiere una ecuación común que pueda explicar todas las relaciones únicas de resistencia-madurez para modelar las relaciones de resistencia-madurez.

CAPITULO 4

4. Metodología experimental.

El trabajo experimental contempló 1 variable dependiente como fue la resistencia a la compresión del concreto obtenida principalmente a partir de 4 variables independientes como lo fueron las pruebas no destructivas y las pruebas semi destructivas dentro de las cuales destacaron: El método de madurez, la prueba de extracción “Pull-Out” LOK-TEST y las pruebas de extracción de núcleos cuya finalidad fue determinar la resistencia a la compresión del concreto en el lugar.

Para lograr los objetivos del desarrollo experimental, se llevaron a cabo cinco diseños de mezclas que en general, tienen más demanda en la industria del concreto. Estos diseños de mezclas de resistencia a la compresión a 28 días fueron $f'c = 200, 250, 300, 400$ y 500 kg/cm^2 . Una vez obtenidos los diseños de las mezclas se comenzaron a implementar los diferentes sistemas de pruebas para obtener este parámetro de resistencia. Es importante mencionar que los resultados obtenidos fueron en base al $f'cr$.

La resistencia potencial a la compresión se obtuvo a partir de especímenes cilíndricos elaborados, curados y ensayados de acuerdo a las normas ASTM C31 [73], ASTM C192 [74] y ASTM C39 [75] respectivamente para obtener las mezclas de control que se utilizarían a lo largo del trabajo experimental. El trabajo experimental constó de seis etapas en las que se tomaron en cuenta en primera instancia desde las propiedades físicas de los materiales para determinar los

parámetros para los diseños de las mezclas, la caracterización del concreto en estado fresco como en estado endurecido y por último la ejecución de las pruebas para obtener la resistencia a la compresión del concreto a través de diferentes métodos y compararla para demostrar la efectividad que tiene cada prueba a través de correlaciones obtenidas de los distintos métodos.

El proyecto de investigación tiene como finalidad realizar las siguientes etapas experimentales:

4.1. Etapa I. Caracterización de los materiales

En esta primera etapa experimental se determinaron las características de los materiales a usar para el diseño de las mezclas de referencia:

Tabla 5. Etapa I.- Propiedades determinadas para la caracterización de los materiales

Etapa I.- Caracterización de los materiales	Materiales	Ds	Abs	PVSS	PVVS	Granulometría	M.F	Cont. de sólidos	Cont. de líquidos
	Grava								
	Arena								
	Cemento								
	Aditivo								

Agregados.

Se llevó a cabo la caracterización de los materiales con los que se realizó el diseño de las mezclas, como se observa en la Tabla 5, para la arena, se determinó la densidad y la absorción de acuerdo a la norma ASTM C128 [76] y para la grava la norma que se utilizó fue la ASTM C127 [77], parte del procedimiento se observa en la Figura 28; la figura 29 muestra la obtención del PVSS y PVVS determinados de acuerdo a la norma ASTM C29 [78]; además se realizó la granulometría de los agregados fino y grueso mostrados en la Figura 30 de acuerdo a la norma ASTM C136 [79].



Figura 28. determinación de la densidad y absorción de los agregados ASTM C127 y
ASTM C 128



figura 29. Obtención del PVVS y PVSS con ASTM C 29/C 29M



Figura 30 Análisis granulométrico de agregado fino y grueso ASTM C136

Cemento

Se determinó la composición química del cemento a través de la fluorescencia de rayos X (véase Figura 31) por medio de un equipo marca PANalytical modelo Epsilon3-XL y la densidad se obtuvo empleando el frasco de Le Chatelier de acuerdo a la norma ASTM C 188 [80].



Figura 31. Prueba de fluorescencia de rayos X en proceso

Aditivo

El aditivo que se utilizó a lo largo de todo el proyecto fue un superfluidificante de la empresa BASF que lleva por nombre comercial Master Gleniun 3400 hecho a base de policarboxilatos, el cual de acuerdo con su ficha

técnica cumple con las especificaciones de la norma ASTM C494 [81] y su dosificación recomendada dada en la ficha técnica es del rango de 1.3 a 7.8 ml/kg de cemento (CC). Las propiedades que se le determinaron fueron el contenido de líquidos y de sólidos para hacer la corrección por humedad del agregado. El contenido de sólidos del aditivo se realizó dejando una muestra de 100 gr en el horno a 105 °C durante 24 horas con un intervalo de temperatura constante.

Tal y como se observa en la Figura 32, el contenido de sólidos se obtuvo a través del calentamiento de una muestra de 100 gr de aditivo a 105°C por 24 horas. Enseguida, se calculó el contenido de sólidos dividiendo el peso del sobrante o residuo sólido entre el peso inicial de la muestra. Se asumió que la pérdida de peso se debe por a la evaporación del agua. Por lo tanto, el porcentaje de agua del aditivo en las mezclas es utilizado para para corregir el agua de reacción en el diseño original de mezcla, de tal forma que la relación a/cm no se altere.



Figura 32. Determinación del contenido de líquidos en el aditivo.

4.2. Etapa II. diseño de mezclas de referencia

Para la segunda etapa se establecieron cinco proporcionamientos de mezclas en el laboratorio de tecnología del concreto para las resistencias $f'c = 200, 250, 300, 400$ y 500 kg/cm^2 utilizando como materiales: cemento CPO 40, arena, grava de TMA= 19 mm, agua, aditivo superfluidificante. La etapa I consideró dos divisiones: la primera, tomó en cuenta la determinación de las propiedades del concreto en su estado plástico y la segunda se refirió a las propiedades del concreto endurecido. El diseño de la mezcla se realizó por volúmenes absolutos considerando el peso seco de los materiales.

Para las mezclas M4 y M5, el contenido de aditivo aumento debido a que la mezcla con cantidades bajas de aditivo, perdían la consistencia y la trabajabilidad rápidamente, debido a la gran cantidad de cemento y a las relaciones a/c relativamente bajas.

El principal problema que se encontró fue que la mezcla tendía a tener un comportamiento viscoso, por esa razón, se consideraron cantidades de aditivo más altas, esto evidentemente modificando el revenimiento de proyecto de 14 cm a un revenimiento de 18 cm, haciéndolo más trabajable.

4.2.1. Pruebas para concreto fresco y endurecido

La Figura 33 muestra un esquema del desarrollo de esta etapa para el diseño de las mezclas. Para cada diseño, las pruebas que se le realizaron en estado plástico fueron: el revenimiento de acuerdo a la norma ASTM C143 [82] [Figura 34 A)], la masa unitaria de acuerdo a la norma ASTM C138 [83] [Figura 34 B)], contenido de aire por el método de presión de acuerdo a ASTM C 231 [84] [Figura 34 C)] y por último se elaboraron los cilindros siguiendo la norma ASTM C31 [73] [Figura 34 D)].

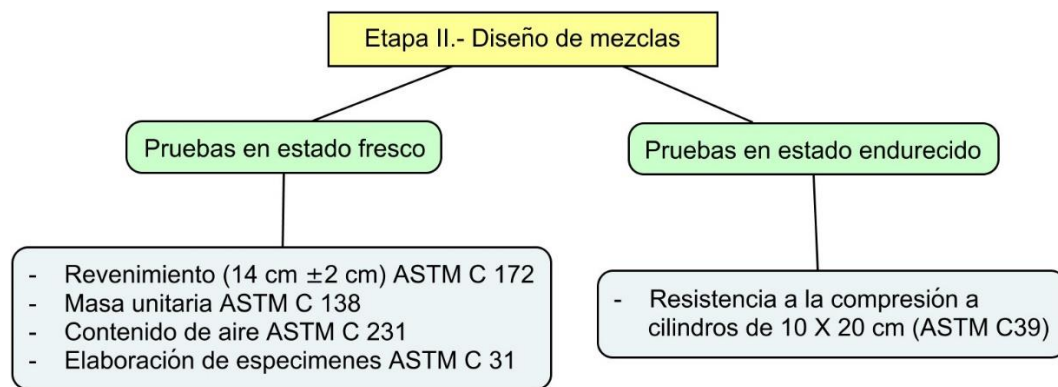


Figura 33. Diseño de mezclas.

4.2.1.1. Revenimiento

Se realizaron pruebas de revenimiento de concreto para determinar la consistencia de la mezcla del concreto fresco. Las pruebas se realizaron para cada bachada por separado de acuerdo con la especificación ASTM C143 [82]. La prueba de revenimiento se realizó tan pronto como se reprodujeron las

mezclas de concreto porque el revenimiento disminuye a medida que pasa el tiempo. Los resultados de las pruebas se utilizaron para controlar la calidad de cada mezcla de concreto fresco.

4.2.1.2. Contenido de aire

Para cada diseño se realizaron pruebas de contenido de aire en el concreto para determinar la cantidad de aire atrapado en el concreto. Todos los procedimientos de prueba siguieron la especificación ASTM C231 [84]. Se usó un medidor de presión como el que se muestra en la Figura 34 C) para medir el volumen de aire. La prueba de contenido de aire se realizó tan pronto como se terminó la prueba del revenimiento.

4.2.1.3. Masa unitaria

Se realizaron pruebas de masa unitaria del concreto para determinar la densidad del concreto en estado fresco. De acuerdo con la especificación ASTM C138 [83], todas las mediciones se realizaron utilizando un medidor de presión tipo B y se calcularon mediante la siguiente ecuación:

$$D = (M_c - M_m) / V_m$$

Ecuación 22

Donde:

M_c = Peso del recipiente que contiene al concreto con concreto.

M_m = Peso del recipiente vacío que contiene al concreto

V_m = Volumen de la medida

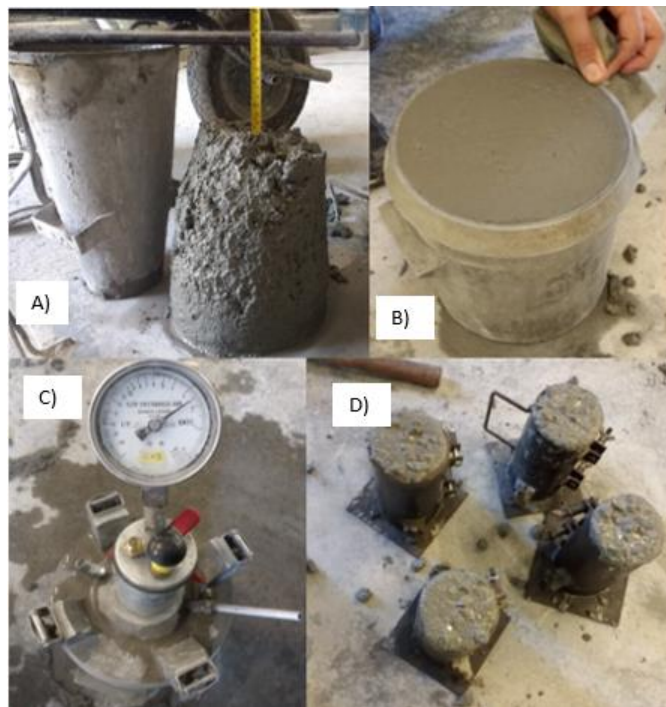


Figura 34. Caracterización de mezcla de referencia en estado fresco y endurecido a través de: A) Revenimiento, B) Masa unitaria, C) Contenido de aire y D) Elaboración de cilindros para la resistencia a la compresión.

4.2.1.4. Resistencia a la compresión

Como parte del segundo conjunto de experimentos, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión en todas las mezclas de concreto a las edades de 1, 2, 3, 7, 14, y 28 días para desarrollar las curvas de resistencia-madurez en condiciones de curado estándar. Todos los procedimientos de resistencia a la compresión siguieron la norma ASTM C39 [75], se implementaron cilindros de 10 X 20 cm a lo largo del trabajo experimental. Para determinar la resistencia potencial del concreto, para el diseño, la resistencia potencial se determinó a la edad de 28 días (véase Figura 35).



Figura 35. Ensayo de resistencia a la compresión del concreto realizado en cilindros de 10 X 20 cm

4.3. Etapa III. Elaboración de prismas de concreto y ensayos a compresión en núcleos.

Para cada mezcla en estudio fue necesario obtener por lo menos 3 prismas para estimar la resistencia a la compresión a diferentes edades mostradas en la Figura 36.

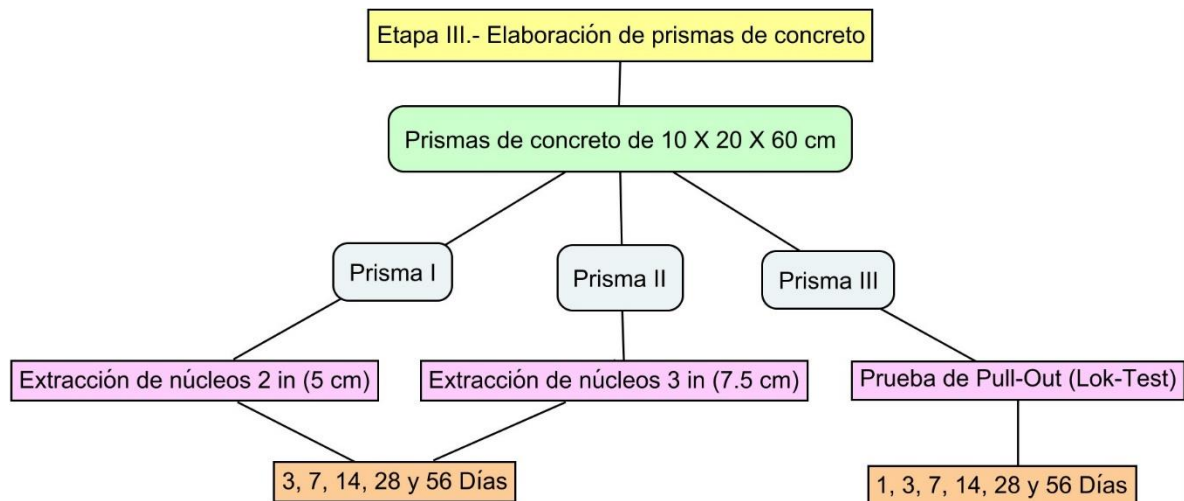


Figura 36. Diseño experimental para la elaboración de los prismas de concreto.

4.3.1. Preparación de los prismas para la prueba de extracción “Pull-Out” LOK-TEST y extracción de núcleos.

Se dejaron embebidos de 11 a 13 insertos por molde previos a la ejecución del colado, en total se realizaron dos moldes para completar un mínimo de 18

insertos colocados en las caras de los prismas y así ejecutar la cantidad mínima de 3 insertos por edad.

Después de preparados los prismas con los insertos para la realización de las pruebas de extracción (véase Figura 37), se comenzó el colado del prisma III, vaciando el concreto en 3 partes de igual volumen, esto con la finalidad de distribuir bien el concreto a lo largo del prisma, posteriormente, el sistema de compactación del molde se realizó de acuerdo a la norma ASTM C39 [75] y se enrasó con una varilla de punta semiesférica; por último, el acabado se realizó con una llana y se embebieron insertos flotantes por la cara de encima del prisma III como se puede apreciar en la Figura 38 y Figura 41.



Figura 37. Molde preparado con insertos previos al vaciado.



Figura 38. Prisma III vaciado con insertos flotantes incluidos en la cara superior del molde.

Posteriormente, se elaboraron los prismas I y II (véase Figura 39) para las extracciones de los núcleos de 5 y de 7.56 cm (2 y 3 in) de diámetro, los moldes se llenaron en su totalidad para extraer núcleos sanos que cumplieran específicamente con la relación 2:1 y no aplicar algún factor de corrección mencionado por la norma ASTM C42 [42], para cumplir este requisito, las dimensiones de los prismas fueron de 20 X 20 X 60 cm para ambos moldes mostrados en la Figura 40 y Figura 41. Las extracciones de los moldes I y II se realizaron para obtener resultados a la edad de 3, 7, 14, 28 y 56 días (véase Figura 40).

Las condiciones del cuarto de curado en las que permanecieron los especímenes fueron a una temperatura controlada de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y a una humedad del 100%.



Figura 39. Prisma I y II (solamente para extracción de núcleos).



Figura 40. Ejecución de la extracción de núcleos a las edades especificadas.



Figura 41. prisma III (solamente para la prueba LOK-TEST)

4.3.2. Ensayos a compresión de los núcleos extraídos de los prismas I y II

La extracción, la preparación y los cuidados que se le brindaron a los núcleos fueron de acuerdo a la norma ASTM C42 [42]. Después de extraídos los núcleos, generalmente 3 núcleos por edad como se muestra en la Figura 42, se cortaron con una sierra en húmedo y se prepararon para ser recapeados de acuerdo a la norma ASTM C617 [85] (véase Figura 43).



Figura 42. Muestra de núcleos para ensayo a una edad especificada



Figura 43. Recapeo y nivelación de núcleos previo al ensayo

Después del recapeo, se prosiguió posteriormente con el ensayo del núcleo después de por lo menos 2 horas de espera para que el azufre adquiriera una resistencia mayor que la del núcleo; Figura 44.



Figura 44. Ensayo a compresión de un núcleo extraído

Para la interpretación de los resultados, es importante mencionar que la estimación del f'_c a través de los criterios del ACI 318-S14, sección 26.12.4.1(d); no se toma en cuenta debido a que los resultados obtenidos fueron sometidos en condiciones controladas de laboratorio y no se extrajeron de un elemento expuesto a condiciones reales. Por lo tanto, esos criterios no se aplicaron para la estimación de la resistencia.

4.3.3. Ensayo de extracción (Pull-Out) “LOK-TEST”

La prueba LOK-TEST se realizó conforme a la norma ASTM C900 [21] siguiendo los procedimientos preestablecidos. Las muestras se extrajeron de los prismas a las edades de 1, 3, 7, 14, 28y 56 días con una cantidad de 3 extracciones por edad (véase la Figura 47, la prueba se ejecutó inmediatamente después de ensayar los cilindros de resistencia potencial de 10 X 20 cm, el prisma se extrajo del cuarto de curado en donde permaneció constantemente durante la terminación de las edades de ensayo, es decir, duró 56 días en curado efectivo; como se observa en la Figura 45.



Figura 45. Prismas de concreto conservados encuarto de curado

La velocidad del giro de carga se aplicó aproximadamente en un giro por cada 3 segundos a velocidad constante y siguiendo los procedimientos mencionados por la norma ASTM C900 [21]. Las zonas de extracción en cada cara del prisma se eligieron aleatoriamente en todos los casos, con la finalidad de tener resultados representativos alrededor del elemento prismático. En la Figura 46 se puede apreciar la ejecución del ensayo y en la Figura 47 se muestran los testigos extraídos para las 4 edades de ensayos.(3 insertos por edad).



Figura 46. Ejecución de la prueba LOK-TEST



Figura 47. Testigos resultantes de la prueba LOK-TEST

4.4. Etapa IV.- Desarrollo del método de madurez

En esta etapa el objetivo fue elaborar especímenes cilíndricos y un prisma con la finalidad de obtener la resistencia a la compresión y el registro de temperaturas internas del concreto para determinar la ganancia de la resistencia respecto al tiempo.

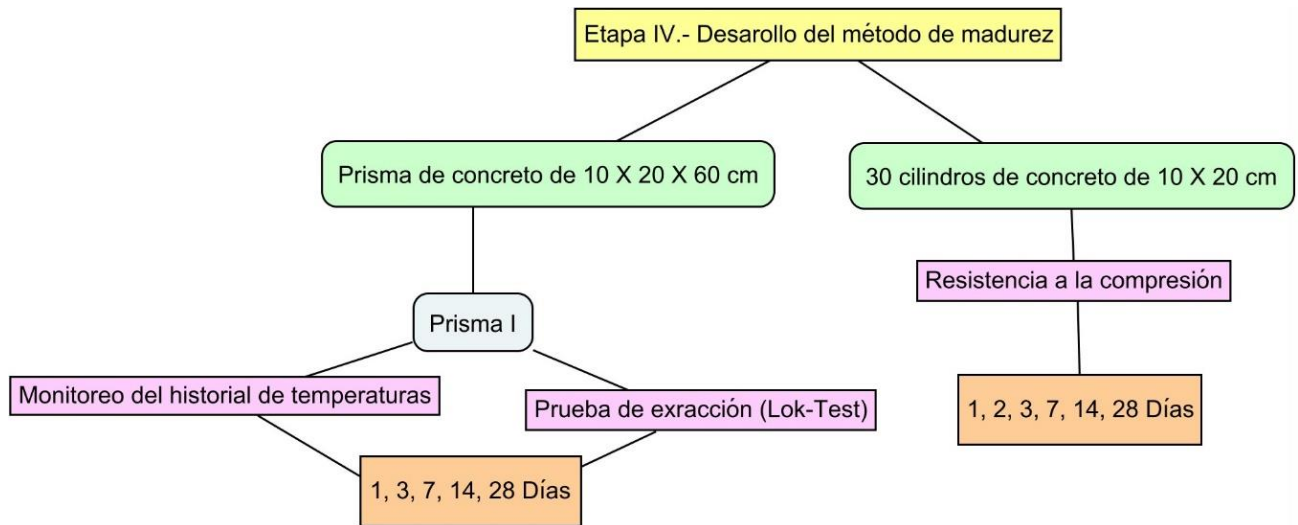


Figura 48. Desarrollo del método de madurez

En la Figura 48 el diagrama describe que para una misma batchada de concreto se elaboraron alrededor de 30 especímenes cilíndricos con la finalidad de obtener ensayos a la compresión a las edades de 1, 2, 3, 7, 14 y 28 días con el objetivo de llevar un control de la resistencia que va adquiriendo el concreto respecto al tiempo y a su misma vez, de la misma batchada se elaboró un prisma con las mismas dimensiones que el mencionado en la sección 4.3.1 con el objetivo de monitorear el historial de temperaturas internas del concreto respecto al tiempo mostrado en la Figura 49. Para tener un mejor ajuste de correlaciones, al prisma se le dejaron embebidos insertos para ensayar a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días con la finalidad de obtener la relación resistencia-madurez.

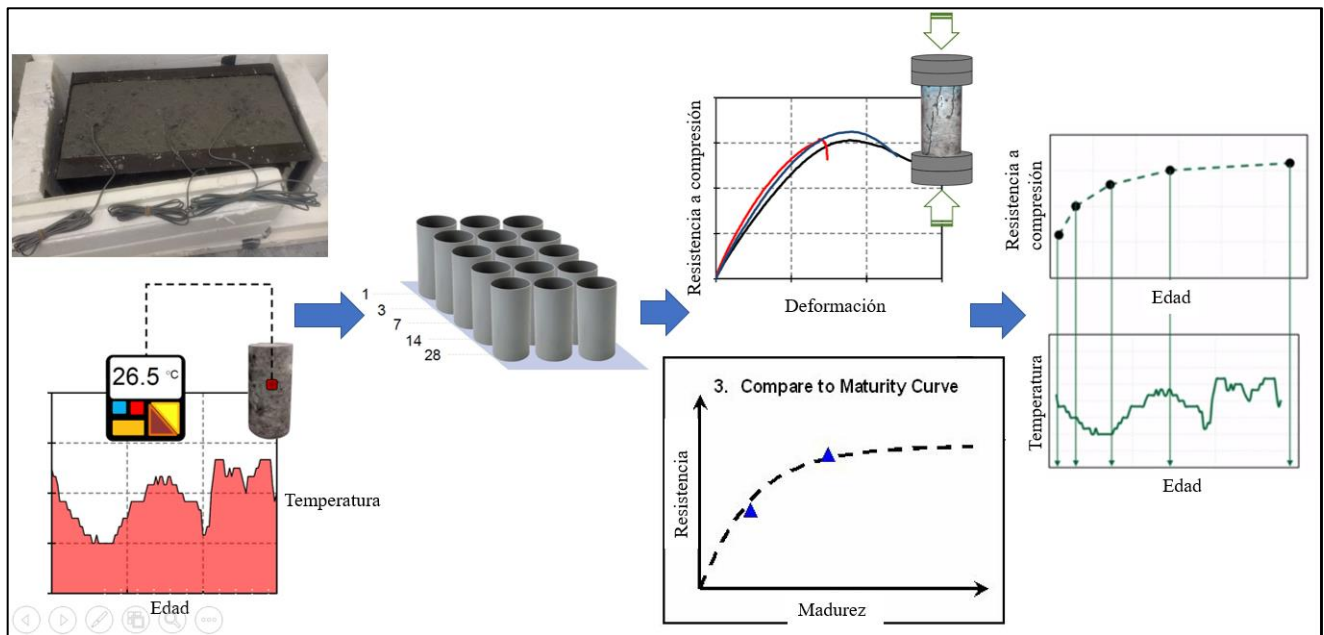


Figura 49. Descripción del método de madurez

4.4.1. Instalación del sensor de temperatura

Como parte del primer conjunto de experimentos que conllevan al método de madurez, los sensores/registradores de temperatura de los sistemas de madurez que llevan por nombre comercial Command Center se compararon entre sí por su precisión y eficiencia. Debido a que la medida de los cilindros de concreto no es representativa para obtener un rango de temperatura en diferentes ubicaciones (10 x 20 cm), todos los sensores/registradores de temperatura fueron preinstalados en 3 puntos medios de los moldes prismáticos antes de colocar el concreto.

En la Figura 50 se muestra el sensor que registró la temperatura del concreto a un rango de temperaturas de por lo menos 28 días con un rango de aproximación de temperaturas del $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, y con registros que pueden ir de 5 a 30 min por medición. En la Figura 51 se muestra el acomodo de los termopares o sensores colocados aproximadamente a 15 cm de separación uno del otro a una profundidad de 10 cm, esto con la finalidad de verificar las variaciones de temperatura que pudiese haber al colocarse en las zonas del centro y los extremos del molde.



Figura 50. Sensor de temperatura Command Center



Figura 51. Sensores instalados en el prisma de concreto

4.5. Etapa V.- Energía de activación E_a y dato de temperatura T_0

Como parte de la segunda fase experimental correspondiente al método de madurez, la Figura 52 muestra las dos subetapas que se describen en los anexos de la norma ASTM C1074 [49] para de obtener la energía de activación E_a y el dato de referencia T_0 en el cual supone que es la temperatura en la que no existe ninguna ganancia de la resistencia.

Las subetapas consistieron en:

Etapas V.I

La energía de activación E_a y el T_0 se determinaron a través de la obtención de los tiempos de fraguado para cada mezcla en particular, sometidos a tres temperaturas, en este caso, las temperaturas que se eligieron fueron 10, 23 y 40°C, y se procedió a aplicar los procedimientos marcados en la norma ASTM C1074 [49] A1.1.7 y A1.2.1.

Etapas V.II

Otro parámetro para determinar la energía de activación y el T_0 es elaborando una mezcla de mortero equivalente que represente la mezcla de concreto que se está estudiando, para esto, es necesario conocer los tiempos de fraguado final del concreto a las tres temperaturas ya mencionadas anteriormente en la etapa V.I y elaborar cubos con mortero equivalente que representen cada mezcla que se está estudiando, se curaron igualmente a las tres temperaturas mencionadas en la etapa V.I, la primer edad de ensayo fue el doble del tiempo del fraguado final y la segunda será el doble del anterior y así sucesivamente hasta completar seis edades de ensayos para obtener una constante de crecimiento que nos permitirá conocer el valor de E_a y T_0 . Este procedimiento se observa en la Figura 52.

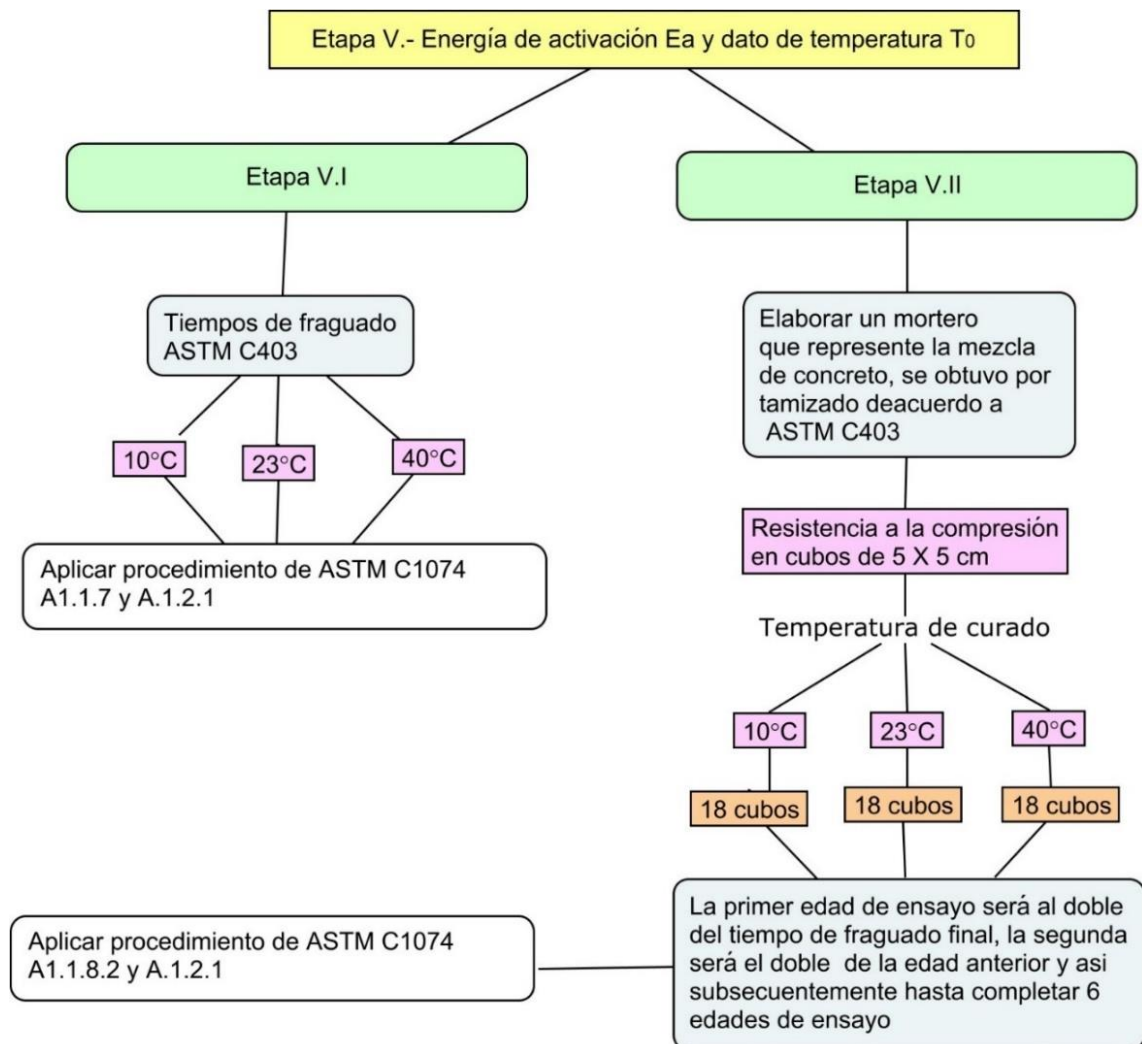


Figura 52. Procedimientos para determinar E_a y T_0

4.5.1. Tiempos de fraguado

Con el fin de determinar el E_a y el T_0 , se realizaron pruebas de tiempo de fraguado inicial y final para todos los diseños de mezcla a temperaturas de 10,

23 y 40°C. La prueba del tiempo de fraguado se realizó de acuerdo con la especificación ASTM C403 [86]. Las muestras de mortero equivalente se obtuvieron tamizando las mezclas de concreto fresco a través de un tamiz No. 4 mostrado en Figura 53 y se realizaron pruebas de penetración en el laboratorio con temperatura controlada, manteniendo una temperatura de 23°C, en el que contenía los equipos para mantener las muestras a 10 y a 40°C. para penetrar estas muestras, se sacaron de la cámara de temperatura solamente al momento de tomar la lectura y se colocaban de regreso a la cámara de temperatura controlada de cada mezcla respectiva, mostradas en la Figura 54.



Figura 53. Obtención de la muestra tamizada por la malla No. 4

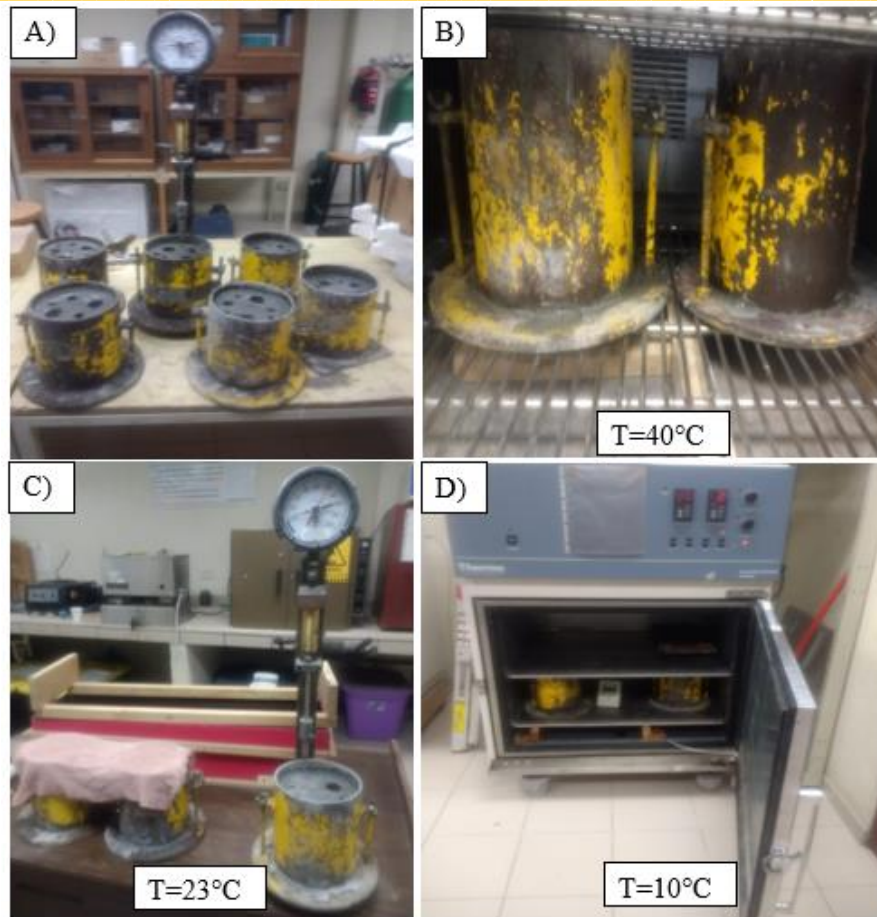


Figura 54. A) Penetración de las muestras extraídas de las cámaras de temperatura, B) Muestras expuestas en cámara a 40°C, C) Muestras expuestas en laboratorio a 23°C, D) Muestras expuestas en camara de refrigeración a 10°C.

4.5.2. Resistencia a la compresión del mortero equivalente

La resistencia del mortero se obtuvo a partir de cubos de 5 X 5 cm elaborados y ensayados de acuerdo a las especificaciones mencionadas en la norma ASTM C109 [87]. Se realizaron tres cubos por edad para un total de seis edades de

ensayo, es decir, 18 cubos en total para una temperatura específica, por lo tanto, se realizó un total de 54 cubos para todas edades y para las tres temperaturas (10, 23 y 40°C) (véase Figura 55). este procedimiento se realizó para cada diseño en específico, en total, para los 5 diseños de mezcla se realizaron una cantidad de 270 cubos.

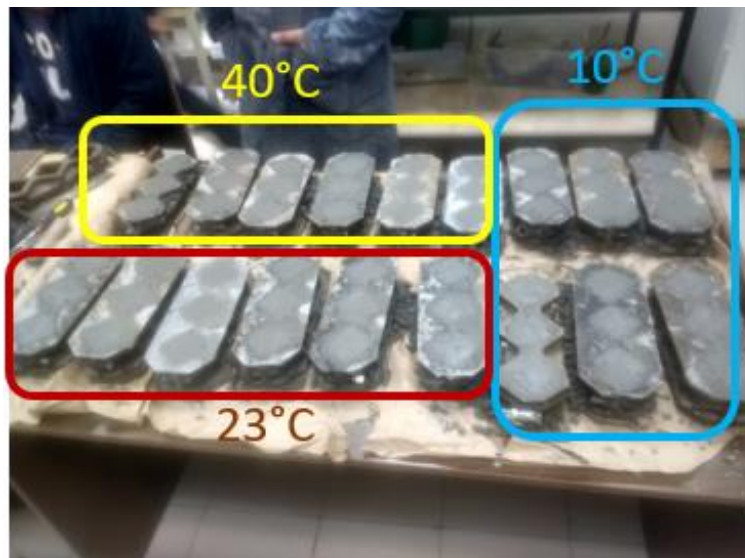


Figura 55. Paquete de cubos para una mezcla específica

4.5.3. Curado de los cubos de mortero equivalente

Después de la fabricación, los moldes se llevaron a sus respectivas cámaras de temperatura para ser almacenados hasta llegarse la primera edad de ensayo, posteriormente, se almacenaron en depósitos con agua saturada con

cal aclimatada a la temperatura específica de cada muestra, y como se muestra en la Figura 56, se mantuvieron sumergidos hasta la fecha de su ensayo.



Curado de especímenes $T=40^{\circ}\text{C}$



Curado de especímenes $T=10^{\circ}\text{C}$



Curado de especímenes $T=23^{\circ}\text{C}$

Figura 56. Curado de especímenes a las temperaturas correspondientes.

4.5.4. Ensayo de los cubos de mortero equivalente

De acuerdo a los procedimientos mencionados en la norma ASTM C1074 [49], la primera edad de ensayo será el doble del tiempo del fraguado final de cada muestra probada a su respectiva temperatura y la segunda será el doble del anterior y así sucesivamente hasta completar seis edades de ensayo. Los especímenes se probaron de acuerdo a la norma ASTM C109 [87] Figura 57.



Figura 57. Ensayos de cubos de mortero equivalente

4.6. Etapa VI. - Correlaciones

En la última etapa, se establecieron correlaciones de los resultados de las resistencias a la compresión obtenidas de los métodos utilizados y se evaluó la

confiabilidad y efectividad que tienen estos para utilizarlos para el aseguramiento de la calidad en las obras.

Tal y como se muestra en la Figura 58, la obtención de la resistencia a través de los métodos de prueba utilizados arroja un resultado de resistencia que se relaciona principalmente con la resistencia a la compresión obtenida por medio de los cilindros de 10 x 20 cm, estas correlaciones se establecieron a partir de métodos estadísticos que mejor ajuste a los resultados.

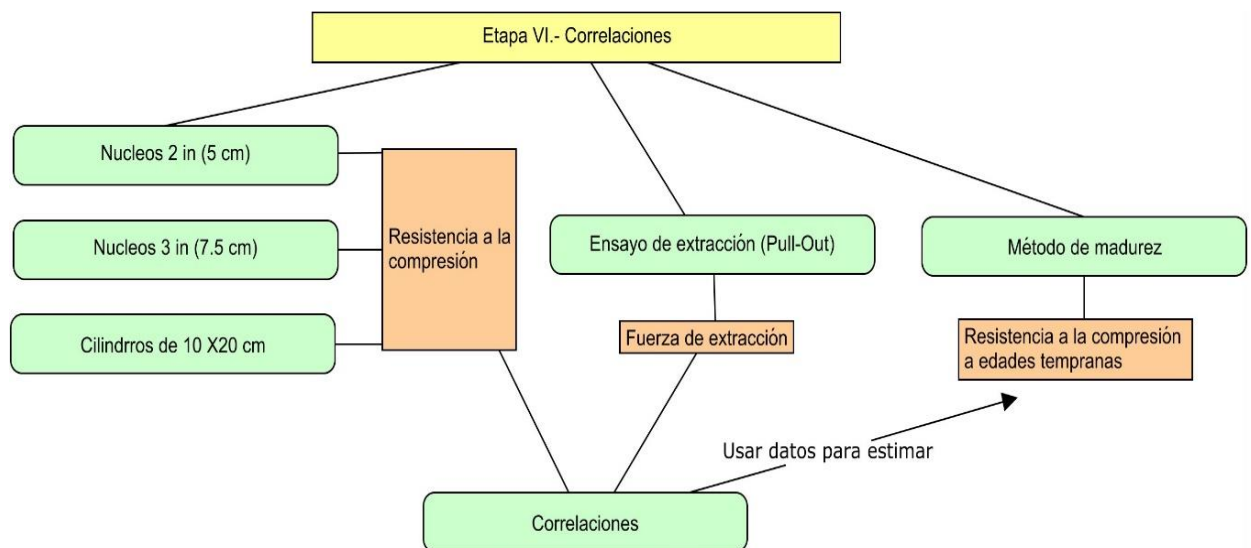


Figura 58. Etapa VI. - Correlaciones de los métodos empleados.

CAPITULO 5

5. Resultados y discusión.

5.1. Caracterización de los materiales

5.1.1. Agregados

Se caracterizaron las propiedades físicas de los agregados en estudio para el diseño de las mezclas. La densidad y absorción de los agregados utilizados para la producción de las mezclas de diseño se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades físicas de los agregados

propiedades de los agregados					
Material	Densidad (gr/cm ³)	Absorción (%)	PVSS (kg/m ³)	PVVS (kg/cm ³)	MF
Arena	2.64	1.21	1685		2.42
Grava	2.67	0.54	1538	1649	

5.1.2. Cemento

La densidad del cemento portland CPO 40 fue determinada de 3.15 (gr/cm³) y revisada de acuerdo a la norma ASTM C-188 [80]. Lo que corresponde a una densidad normal dentro de las tolerancias del cemento CPO 40.

5.1.3. Composición química del cemento CPO 40

La Tabla 7 presenta la composición química la cual fue determinada mediante fluorescencia de rayos “X” (FRX) y nos indica que los porcentajes de concentración según la norma ASTM C150 [88] se encuentran dentro de las tolerancias.

Tabla 7. Composición química del cemento CPO 40

Compuesto	Concentración (%)								
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
CPO 40	1.204	3.243	23.028	5.802	1.338	61.148	0.221	0.104	3.601

5.1.4. Aditivo

La densidad del aditivo superfluidificante utilizado en esta investigación es de 1.09 g/cm³ la cual es congruente con la información de la ficha técnica de seguridad provista por el proveedor. El contenido de sólidos mostrado en la Tabla 8 fue de 43%, el 57% restante se consideró como parte del agua de reacción.

Tabla 8. Densidad, % de contenido de sólidos y % de contenido de líquidos

	Aditivo SP		
	Contenido de sólidos	Contenido de líquido	Densidad (g/cm ³)
Glenium 3400	43%	57%	1.12

5.2. Resultados experimentales.

5.2.1. Diseño de mezclas de referencia.

Tabla 9. Caracterización de los diseños de mezclas de referencia

Mezclas	Peso de los materiales secos por m ³ sin agua de absorción				
	M1	M2	M3	M4	M5
Materiales	200 kg/cm ²	250 kg/cm ²	300 kg/cm ²	400 kg/cm ²	500 kg/cm ²
Agua (kg)	143	150	147	139	145
Cemento (kg)	220	250	270	400	490
Arena (kg)	1144	1099	1092	1023	830
Grava (kg)	872	873	867	846	945
Aditivo (ml/kg C)	3.5	3.7	3.8	4.1	4.3
Relación a/c	0.65	0.6	0.55	0.35	0.3
Relación G/A	0.76	0.79	0.79	0.82	1.13
Aire (%)	3.1	2.8	2.8	2.3	2
Revenimiento (cm)	13	14	14	18	18
Masa unitaria (kg/m ³)	2307	2371	2376	2403	2410
fcr (kgf/cm ²)	224	258	310	418	523

Se realizaron varias pruebas para determinar las cantidades óptimas para cada diseño especificado. Se propusieron 5 diseños de mezclas y a cada uno de ellos se les evaluó sus propiedades en estado fresco y en estado endurecido se evaluó el $f'c$ potencial a los 28 días. Estas propiedades se muestran en la Tabla 9. El proporcionamiento de los materiales se consideró por medio de volúmenes absolutos y contempló el peso seco de los materiales empleados.

5.2.2. Resistencia a la compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión y los intervalos de desviación estándar calculados se muestran en la Tabla 10 La resistencia a la compresión se determinó en cada repetición de la mezcla de referencia a las edades de 1, 3, 7 y 28 días.

Tabla 10. Resistencia a la compresión y desviación estándar de las mezclas de referencia comparada con la resistencia y desviación estándar de los núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) y con la fuerza de extracción obtenida por el sistema LOK-TEST.

Días	Resistencia (Mpa)			Fuerza (kN)	Desviación estándar S (Mpa)			S (kN)
	Cilindros (10 x 20 cm)	Núcleos 2 in (4.5 cm)	Núcleos 3 in (6.9 cm)	Pull-out	Cilindros (10 x 20 cm)	Núcleos 2 in (4.5 cm)	Núcleos 3 in (6.9 cm)	Pull-out
M1								
1	11.37	-	-	11.40	0.49	-	-	0.21
3	17.94	16.08	17.55	16.50	0.36	0.84	0.51	0.80
7	21.47	18.92	19.41	22.10	0.34	0.90	0.60	0.64
14	21.67	18.63	21.18	22.00	0.20	1.27	0.79	0.67
28	21.96	20.39	21.37	23.30	0.26	1.69	0.81	0.87
56	22.65	20.78	21.86	25.83	0.20	1.69	1.02	0.23
M2								
1	13.73	-	-	17.00	0.44	-	-	1.12
3	21.37	16.18	20.00	22.00	0.43	0.83	1.31	1.06
7	23.73	18.73	22.65	23.30	0.44	1.37	0.49	2.75
14	24.31	22.06	23.82	23.90	0.86	0.74	0.91	0.36
28	25.29	23.53	24.61	24.70	0.70	1.44	1.29	0.42
56	26.76	25.20	26.08	26.60	0.38	1.22	1.14	1.48
M3								
1	11.96	-	-	13.30	0.75	-	-	2.60
3	20.78	17.35	19.71	23.40	1.27	2.57	1.95	2.72
7	23.82	19.80	22.65	25.70	0.73	1.64	1.47	0.49
14	28.43	21.96	25.78	26.80	1.04	1.85	1.27	0.36
28	30.88	24.80	29.12	32.60	0.97	1.08	1.26	1.67
56	33.33	27.16	30.78	33.90	0.90	1.27	1.43	0.20
M4								
1	20.49	-	-	19.20	0.81	-	-	1.81
3	27.84	19.51	25.20	21.50	1.20	1.76	1.40	1.41
7	30.59	26.47	28.24	27.00	0.60	1.28	0.69	0.99
14	34.22	31.47	32.65	32.00	0.82	1.53	1.95	1.53
28	40.49	36.08	37.55	35.50	1.49	1.68	1.75	2.04
56	43.039	40.09	40.58	40.60	0.72	1.59	1.32	2.12

M5								
1	38.43	-	-	37.40	1.55	-	-	1.74
3	44.61	40.78	41.57	39.85	1.66	1.66	1.41	0.21
7	46.27	41.47	44.80	42.62	0.38	2.44	1.99	0.57
14	47.06	45.78	45.98	43.01	0.34	2.15	1.31	1.14
28	51.27	49.02	50.49	44.63	0.70	2.52	1.43	0.86
56	55.59	50.00	50.88	46.80	1.93	1.90	1.30	1.33

Para cada mezcla en estudio se ensayaron 5 cilindros de 10 x 20 cm por edad a las edades de 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días y las resistencias mostradas en la Tabla 10 son el promedio obtenido de 3 cilindros. De igual manera, los núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) se ensayaron a las edades de 3, 7, 14, 28 y 56 días, se extrajeron y ensayaron 3 núcleos por edad.

En el caso de los resultados de extracción; se probaron 3 insertos por edad a 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días. Es importante mencionar que los resultados a través del sistema LOK-TEST se obtienen en un tiempo promedio de 5 minutos por prueba, lo que se vuelve un método completamente eficiente en las cuestiones de la obtención de resultados oportunos y rápidos.

A continuación, se muestra la comparación de los ensayos a cilindros de 10 x 20 cm con los núcleos de 2 y 3 in (4.5 y 6.9 cm).

M1

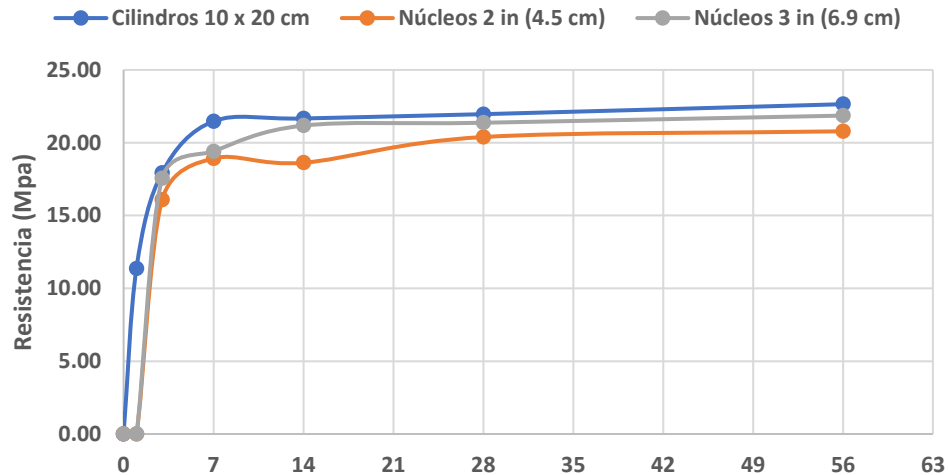


Figura 59. Comparación de la resistencia a compresión de los cilindros vs núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) de la mezcla M1

M2

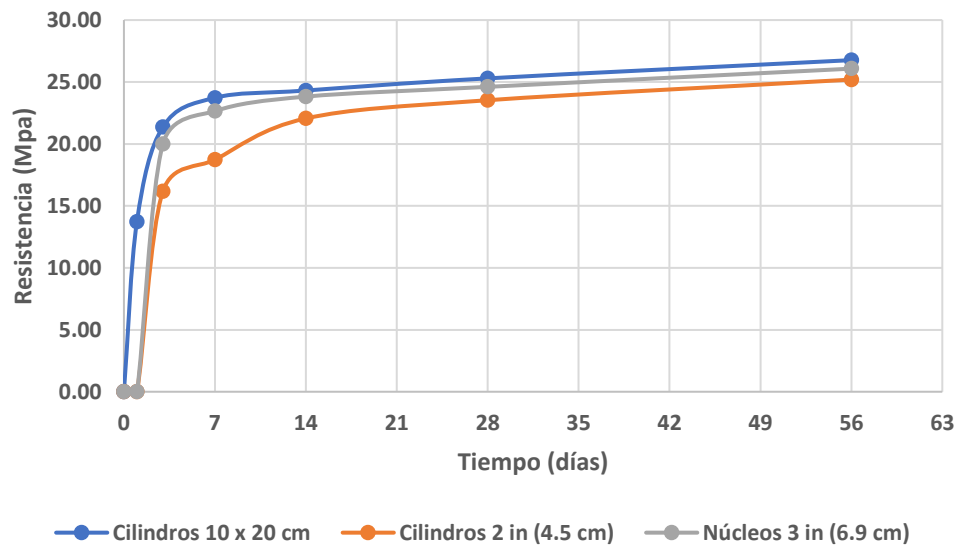


Figura 60. Comparación de la resistencia a compresión de los cilindros vs núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) de la mezcla M2

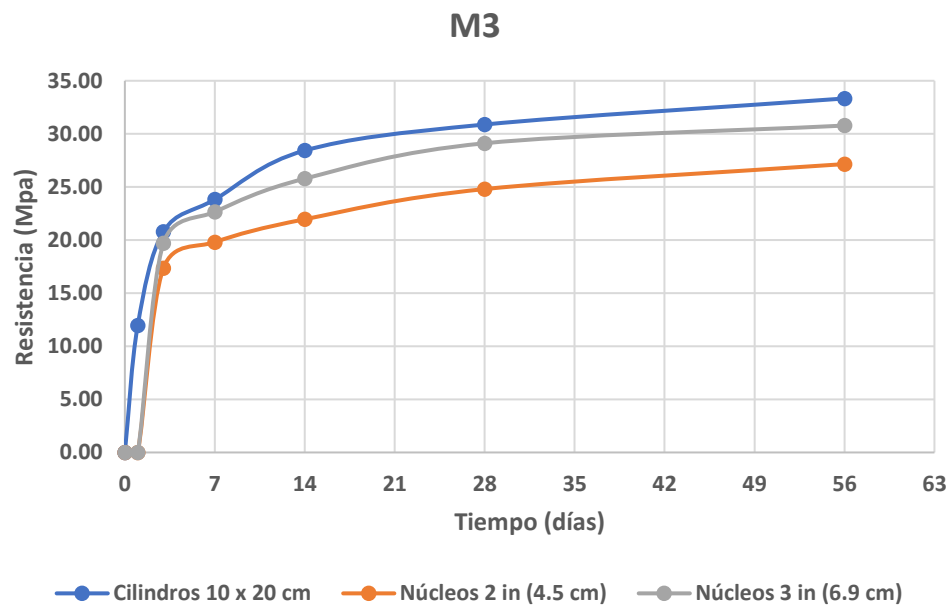


Figura 61. Comparación de la resistencia a compresión de los cilindros vs núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) de la mezcla M3

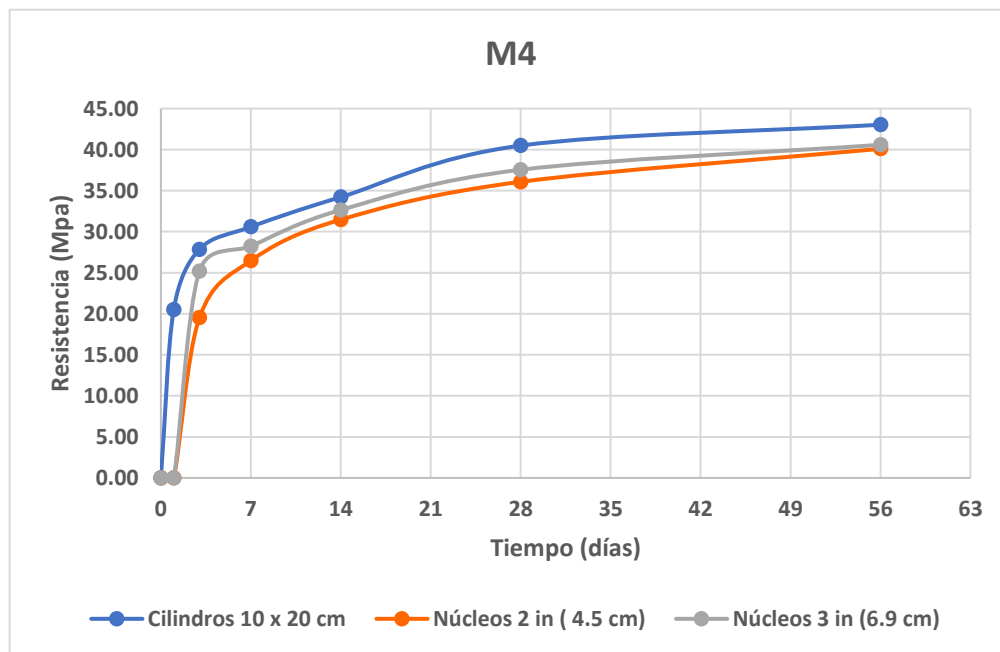


Figura 62. Comparación de la resistencia a compresión de los cilindros vs núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) de la mezcla M4

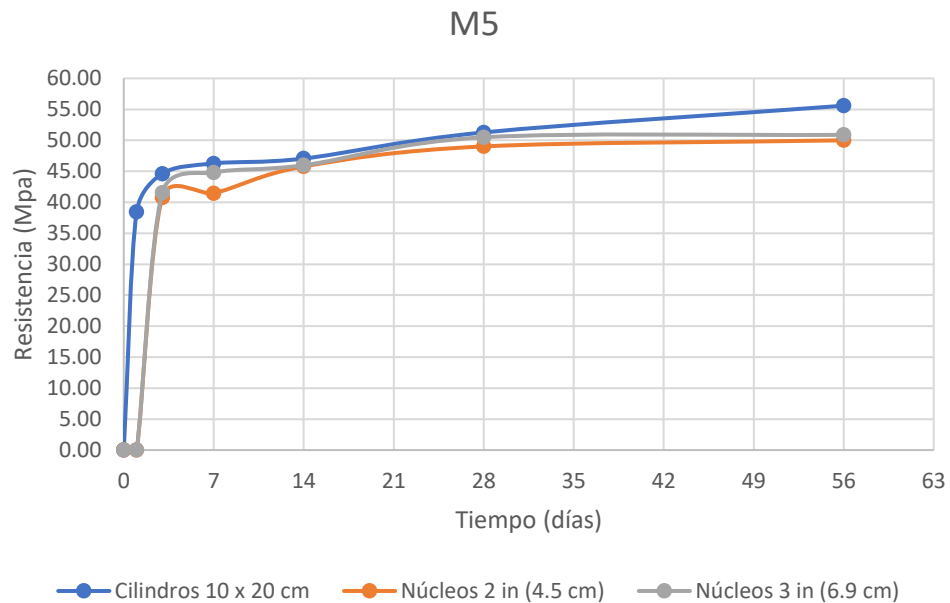


Figura 63. Comparación de la resistencia a compresión de los cilindros vs núcleos de 2 y 3in (4.5 y 6.9 cm) de la mezcla M5

En las figuras anteriores [Figura 59-Figura 63] se aprecia que en todos los casos, la resistencia a la compresión obtenida a partir de los cilindros es mayor que la de los núcleos de 2 y 3 in (4.5 y 6.9 cm) estas variaciones van desde un 4 a un 11%, y por otro lado, la resistencia obtenida por los núcleos de 3 in, es en todos los casos mayor que la resistencia obtenida con los núcleos de 2 in en variaciones que van desde un 4% hasta un 9%. Estas variaciones son principalmente causadas por defectos físicos en los testigos de concreto, la interacción de la pasta con el agregado grueso, la preparación de los especímenes así como el personal que lleva a cabo los ensayos.

Para todas las mezclas se pudo observar que la resistencia a la compresión obtenida a través de los núcleos de 2 in (4.5 cm) tuvo una desviación estándar más alta en comparación con los otros tamaños de especímenes, esto se puede atribuir debido a factores como: la extracción del núcleo, la compactación, el tamaño máximo del agregado, el corte en húmedo por aserrado, así como el cabeceo de los especímenes; esto tiene una influencia importante sobre la resistencia a la compresión del concreto. Para la resistencia obtenida de los núcleos de 3 in (6.9 cm) la desviación estándar fue menor en comparación que la obtenida de los núcleos de 2 in (4.5 cm) esto se atribuye a que el tamaño del espécimen aumentó y por consecuencia hubo mejor interacción entre la pasta y el agregado, pero, aun así, la desviación estándar fue alta.

La desviación estándar en las mezclas M4 y M5 fue significativamente mayor en los núcleos de 2 in (4.5 cm) comparados vs los cilindros de 10 x 20 cm.

5.2.3. Correlaciones de Núcleos de 2 in (4.5 cm) y 3 in (6.9 cm) VS cilindros 10 x 20 cm

A continuación, se muestran las correlaciones que se obtuvieron tomando como referencia los cilindros de 10 x 20 cm correlacionados con la resistencia a la compresión de los también especímenes cilíndricos de 2 y 3 in (4.5 y 6.9 cm), lo mostrado en las Figura 64-Figura 65 evidencia que los núcleos son un método confiable para obtener la resistencia puesto que el tamaño del núcleo es un parametro importante para conocer dicha propiedad; varios autores mencionan

que los resultados de los núcleos son influenciados por los tratamientos y cuidados que se le den previos a la extracción y al ensayo [36] [32].

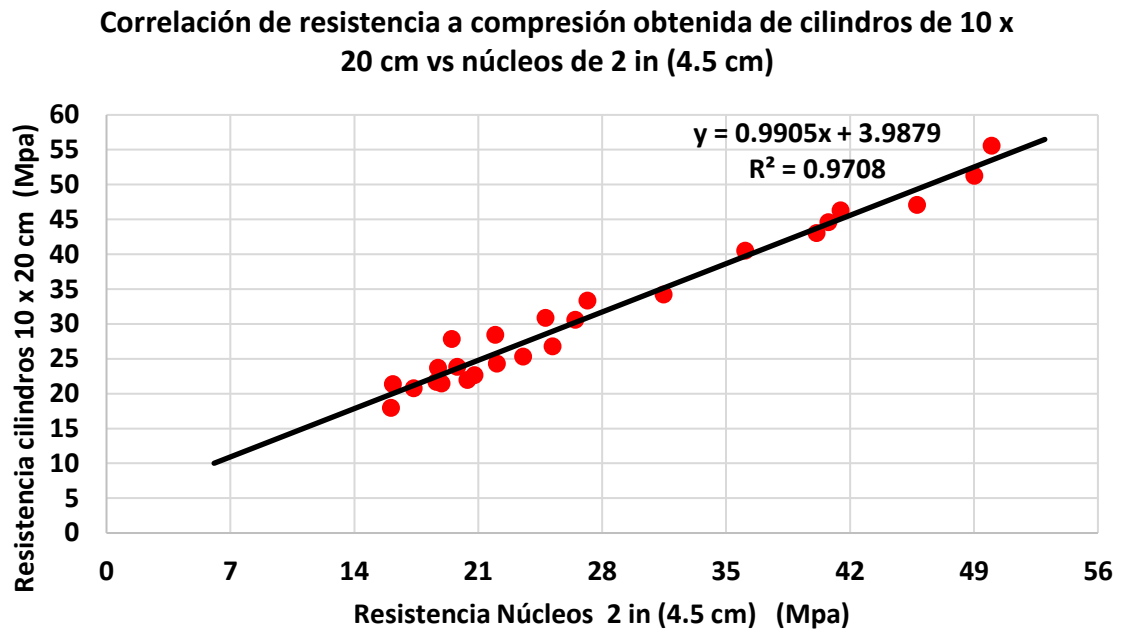


Figura 64. Correlación de resistencia a compresión obtenida de cilindros de 10 x 20 cm vs núcleos de 2 in (4.5 cm)

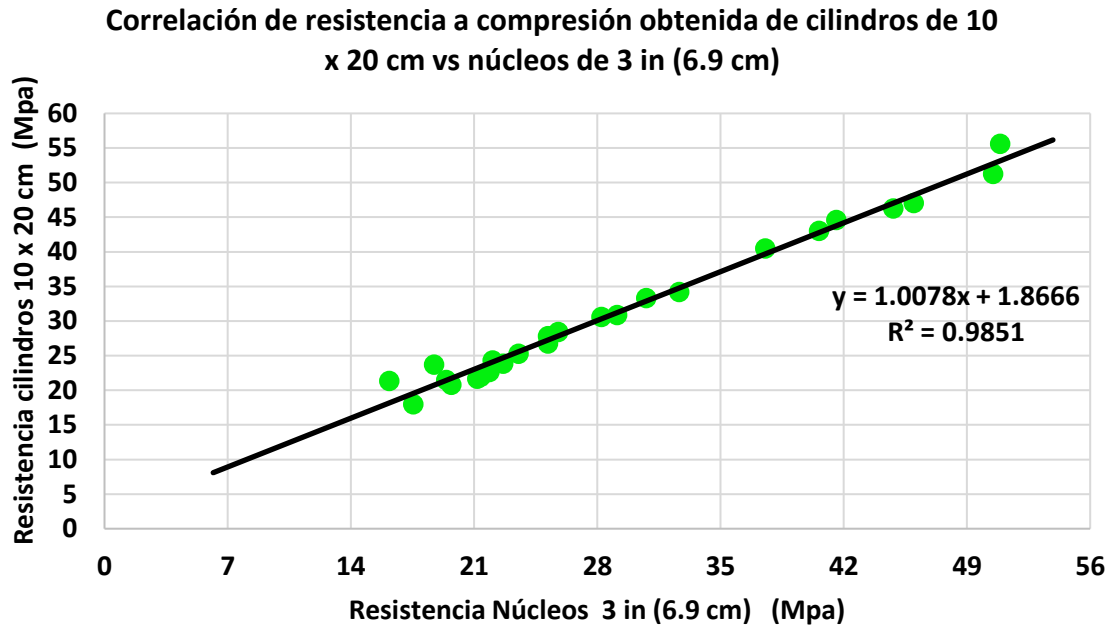


Figura 65. Correlación de resistencia a compresión obtenida de cilindros de 10 x 20 cm vs núcleos de 3 in (6.9 cm)

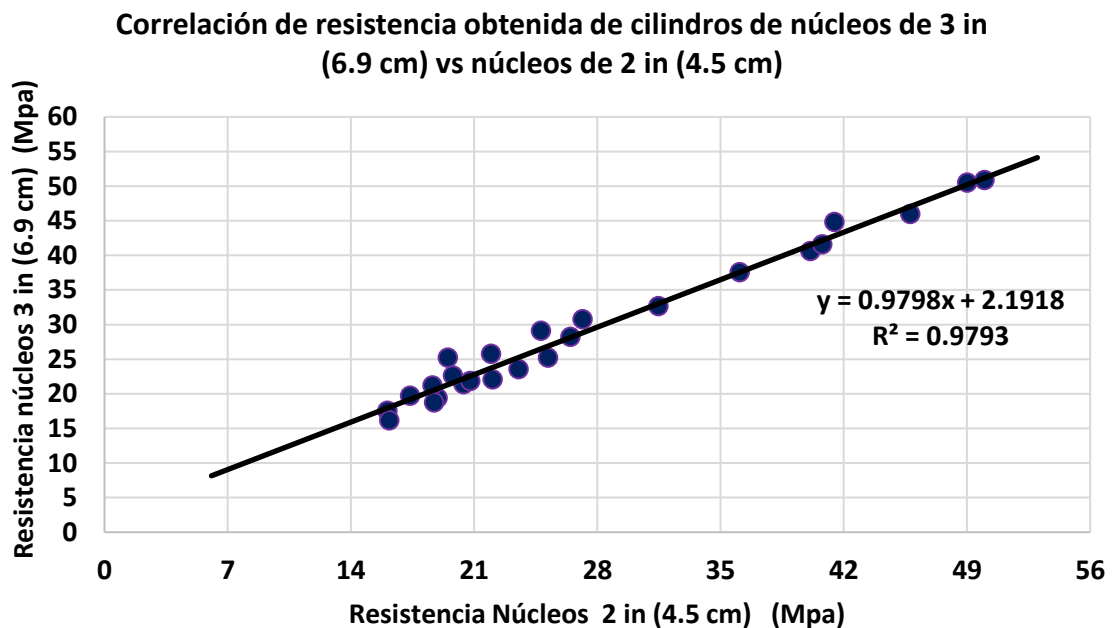


Figura 66. Correlación de resistencia obtenida de cilindros de núcleos de 3 in (6.9cm) vs núcleos de 2 in (4.5cm)

Los corazones son un buen método para estimar la resistencia del concreto en el lugar debido a que, a pesar de tener una desviación estándar alta, tienen una buena correlación con los cilindros, presentando un coeficiente de correlación de $R=0.97$ para núcleos de 2 in (4.5 cm) [Figura 64] y $R=.985$ para núcleos de 3 in (6.9 cm) [Figura 65]. Estos valores de coeficientes de correlación se consideran valores confiables según trabajos que indican los rangos variables de R [89].

Los núcleos de 2 in (4.5 cm) vs núcleos de 3 in (6.9 cm) presentan un buen coeficiente de correlación $R=0.9793$, pero la desviación estándar en la resistencia a la compresión comparada con los cilindros es alta en valores que van desde un 4 a 11%.

5.2.4. Correlaciones de cilindros de 10 x 20 cm, Núcleos de 2 in (4.5 cm) y 3 in (6.9 cm) VS Prueba de extracción (Pull-Out)

Las correlaciones obtenidas muestran que la prueba de extracción LOK-TEST tiene un buen ajuste a los resultados de resistencia a la compresión, lo que concuerda con los trabajos reportados por [60], en los que encontraron por medio de un análisis de regresión lineal una R de 0.865.

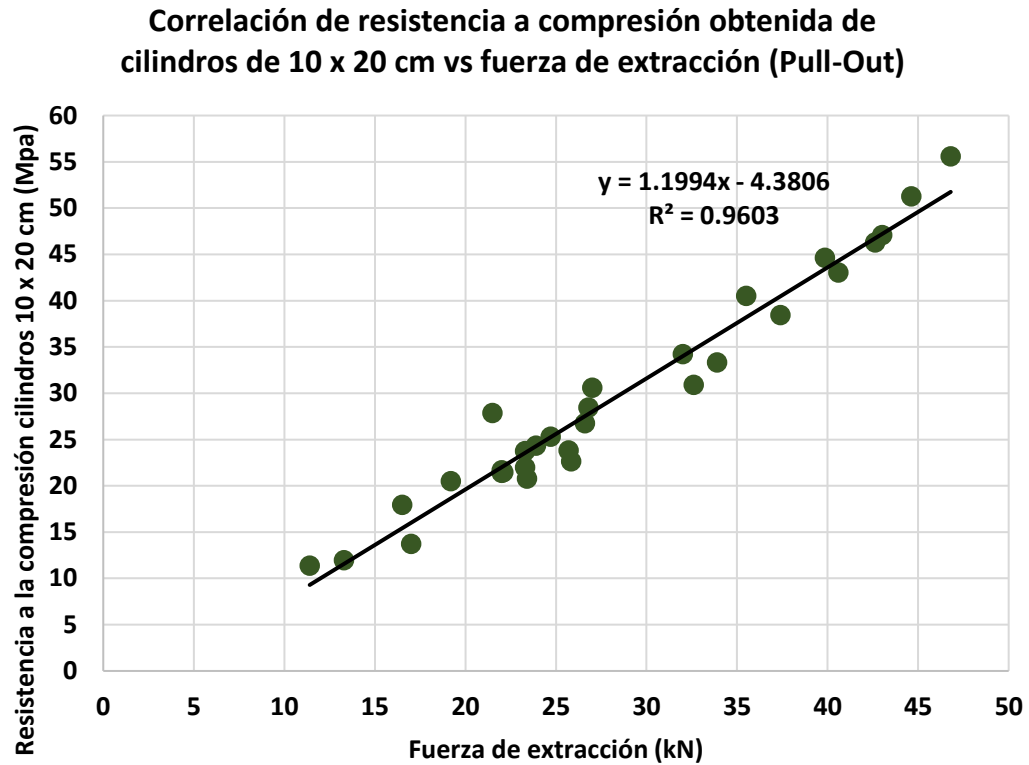


Figura 67. Correlación de resistencia a compresión obtenida de cilindros de 10 x 20 cm vs fuerza de extracción (Pull-Out)

**Correlación de resistencia a compresión obtenida de núcleos
de 2 in (4.5 cm) vs fuerza de extracción (Pull-Out)**

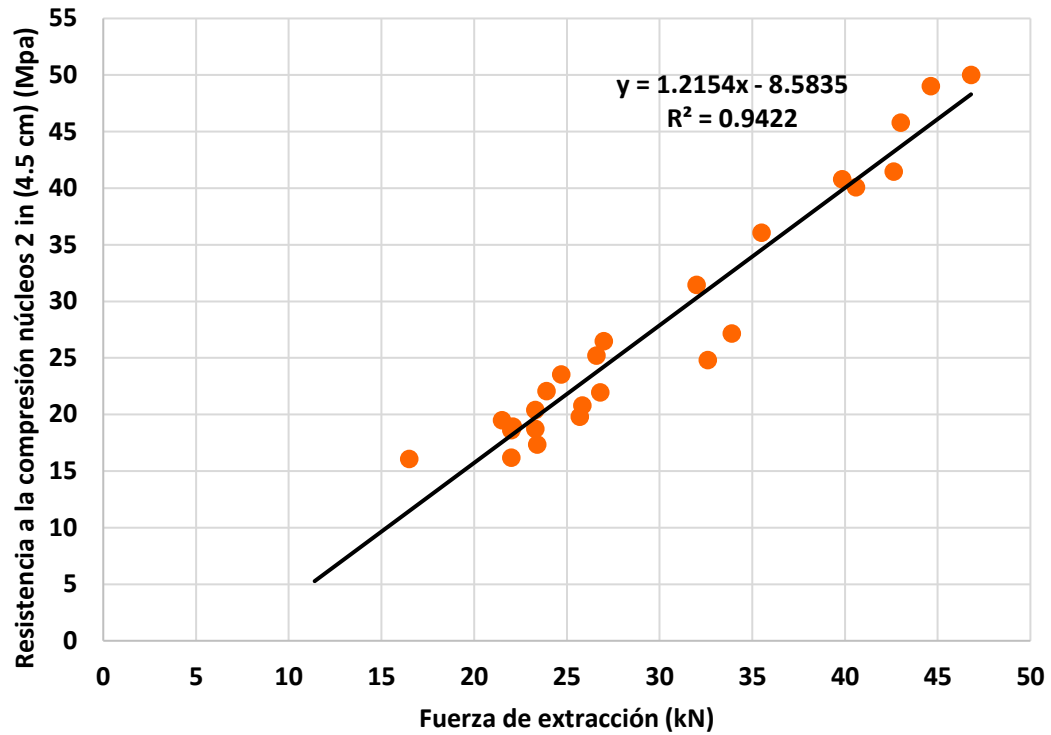


Figura 68. Correlación de la resistencia a compresión obtenida de núcleos de 2 in (4.5 cm) vs fuerza de extracción (Pull-Out)

**Correlación de resistencia a compresión obtenida de núcleos
de 3 in (6.9 cm) vs fuerza de extracción (Pull-Out)**

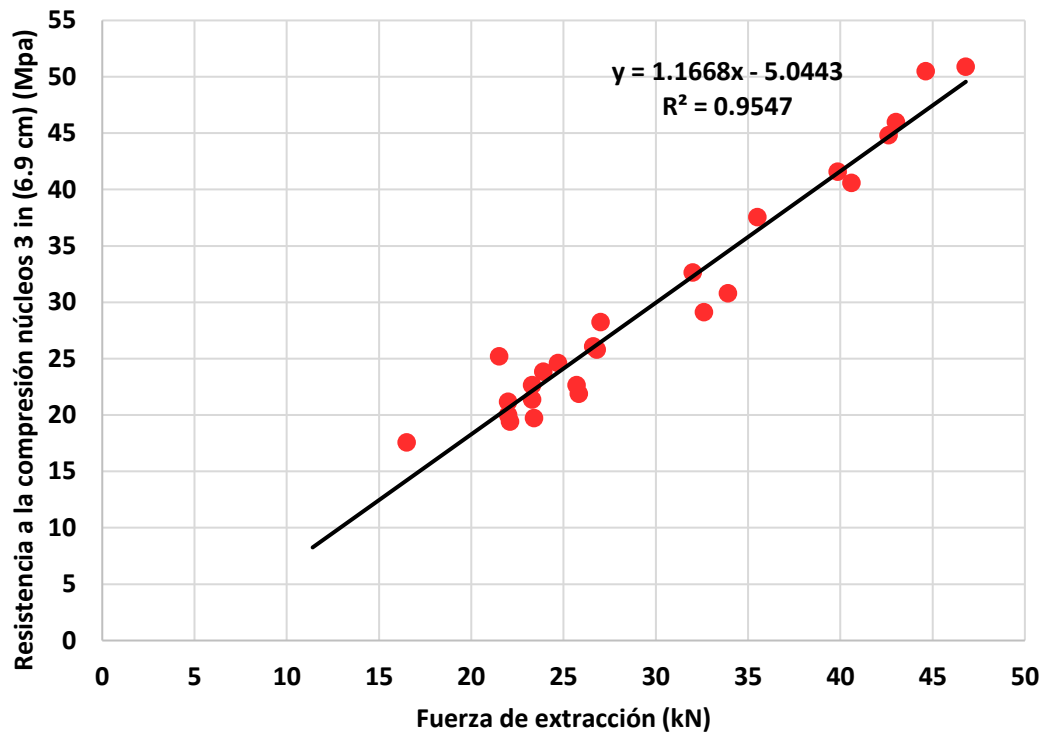


Figura 69. Correlación de la resistencia a compresión obtenida de núcleos de 3 in (6.9 cm) vs fuerza de extracción

Los trabajos experimentales muestran buenas tendencias en cuanto a la correlación del concreto, pero hay que tener en cuenta que la resistencia obtenida por los núcleos de 2 in (4.5 cm) tiene una desviación estándar considerablemente alta, pero, aun así, muestran valores de ajuste estadísticamente muy buenos, presentando un coeficiente de correlación de $R=0.95$.

Los coeficientes de correlación de los cilindros tienen coeficiente de correlación de $R=0.96$ comparado con la fuerza de extracción. Los resultados son alentadores debido a que las variaciones que se presentan son mínimas.

5.2.5. Comparación de modelos de correlación con los resultados encontrados en la investigación

Basado en la revisión de la literatura disponible actualmente, los estudios relacionados sobre la correlación entre la fuerza de extracción máxima medida a partir de una prueba de extracción y la resistencia a la compresión de un núcleo son limitados y actualmente se han estudiado dos modelos de correlación presentados en la literatura en la que se compararan con las correlaciones del presente estudio. Como se mencionó anteriormente en los antecedentes, se desarrolló un modelo de correlación basado en un estudio de pruebas de extracción en puentes, que fue realizado por Moczko, Carino y Petersen en 2016 [28], y otro modelo fue desarrollado basado en 18 estudios diferentes en un periodo de 20 años de experiencia que al pasar de los años se concluyó que el modelo general para estimar la resistencia de los cilindros de concreto es sumamente confiable [3].

Los resultados en la presente investigación mostrados en la Figura 70 ilustran la comparación de las correlaciones obtenidas con los estudios anteriormente mencionados a partir de los cilindros de 10 x 20 cm y se puede observar que

existe una variación del 6% con respecto a la correlación obtenida de los núcleos de 3 in (6.9 cm). Para los núcleos de 2 in (4.5 cm) se muestra una variación del 8%. En ambos casos las variaciones estuvieron por debajo de la resistencia que se presenta en los cilindros elaborados con procedimientos estándar, sin embargo, al igual que en los cilindros, la prueba de extracción demuestra que es un método eficiente para estimar las condiciones reales que se presentan en alguna estructura ya que el valor de correlación corresponde a un 96% de confiabilidad en el caso de la resistencia a la compresión.

La comparación de los resultados con los de la literatura demuestra que la correlación presentada por los núcleos y los cilindros de 10 x 20 cm tienen un comportamiento similar y algo que es importante mencionar es que la correlación evaluada en este presente estudio muestra un comportamiento que es prácticamente el mismo con respecto a la correlación general presentada por Claus Germann [3]. Estas comparaciones se presentan en la Figura 71.

Las correlaciones de los núcleos presentadas en el presente trabajo demostraron tener una buena correlación con la resistencia a la extracción ya que el concreto evaluado fue probado bajo diferentes relaciones a/c y los proporcionamientos fueron completamente diferentes entre sí.

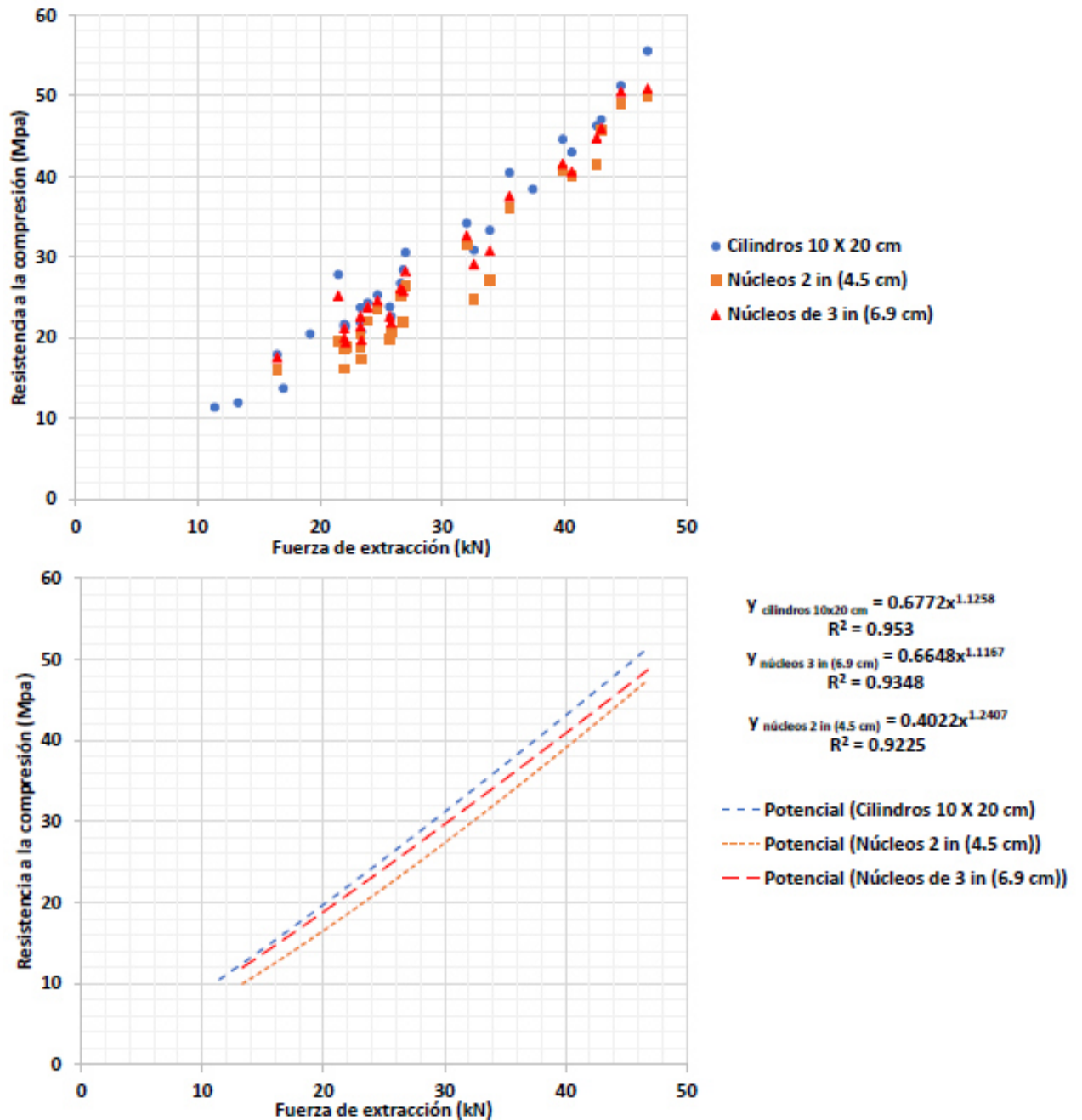


Figura 70. Comparación de Correlaciones obtenidas en el presente estudio

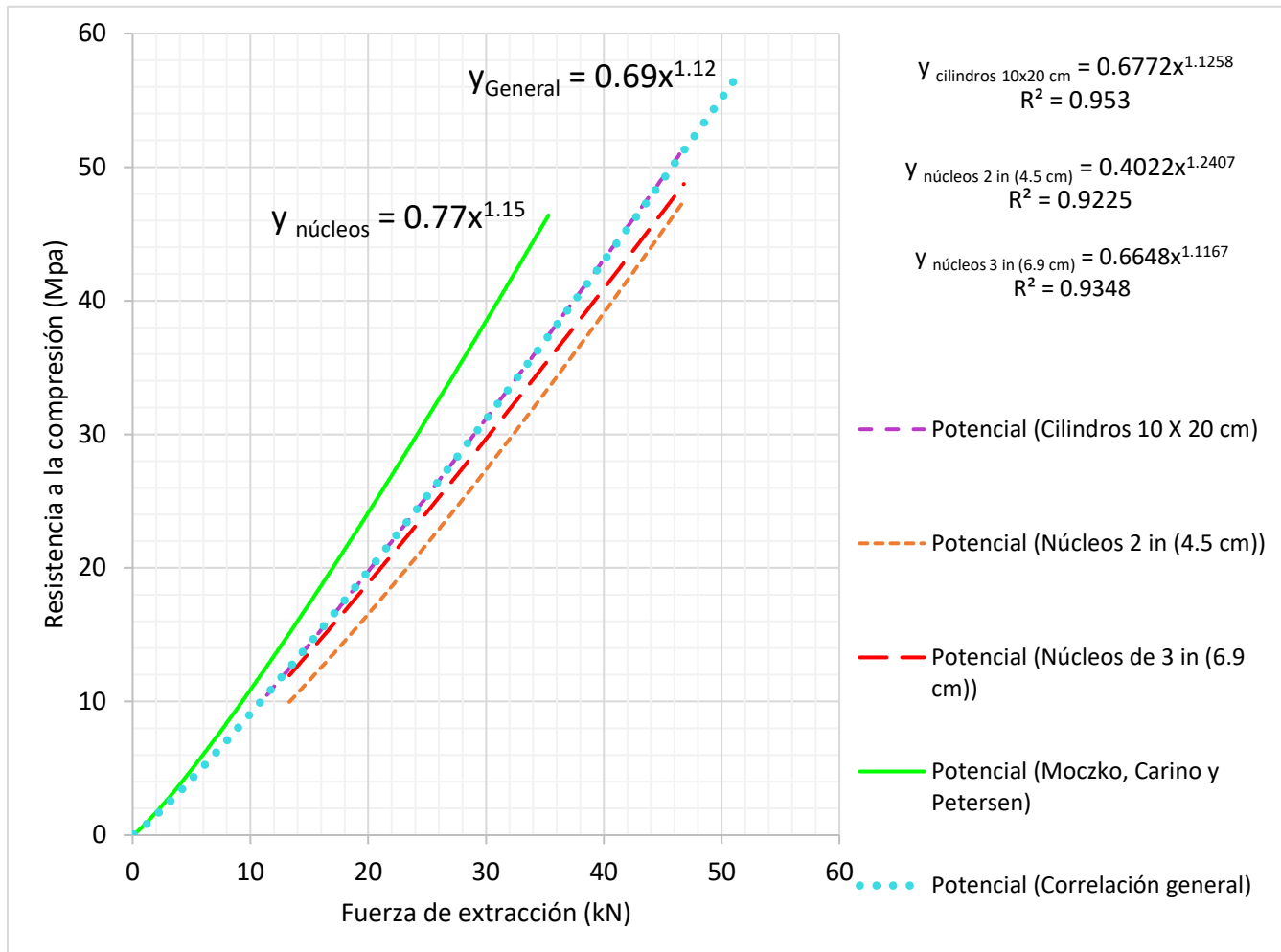


Figura 71.Comparación de modelos de correlación

5.3. Resultados del método de madurez

5.3.1. Tiempos de fraguado del concreto

Los tiempos de fraguado se determinaron de acuerdo a la norma ASTM C403 sometidos a tres temperaturas diferentes (10, 23 y 40 °C).

Se obtuvo una muestra representativa del mortero en estudio, se coloca en un recipiente indeformable y se almacena a una temperatura específica. Justo antes de realizar el ensayo de penetración con el penetrómetro, se removió el agua de exudación de la superficie y a intervalos regulares de tiempo se midió la resistencia a la penetración del mortero por agujas estándar. A continuación, Se realizó una gráfica de la resistencia a la penetración en función del tiempo transcurrido, de la cual se determinaron los tiempos de fraguado inicial ($f_i=35$ kg/cm²) y fraguado final ($f_f=280$ kg/cm²). La siguiente tabla muestra los resultados de las 5 mezclas en estudio.

Tabla 11. Tiempos de fraguado inicial y final de las mezclas en estudio

Mezcla	Temperatura (°C)	Tiempos de fraguado			
		inicial (min)	Final (min)	Inicial (hrs)	Final (hrs)
M1	10.6	318	622	5.3	10.37
	23.4	258	454	4.3	7.56
	39.7	205	329	3.42	5.48
M2	10.2	404	634	6.75	10.56
	23.1	268	424	4.46	7.06
	40.5	210	292	3.5	4.86
M3	10.1	341	537	5.68	9.33
	23.1	252	406	4.2	6.76
	40.3	185	267	3.08	4.45
M4	9.8	321	486	5.35	8.1
	23.3	270	416	4.5	6.93
	40	201	294	3.35	4.9
M5	9.5	317	457	5.28	7.62
	23.4	282	402	4.7	6.7
	41	220	337	3.66	5.6

En prácticamente todos los resultados se observó que las muestras expuestas a altas temperaturas, su fraguado inicial y final incrementó considerablemente, y, por otro lado, los que se sometieron a bajas temperaturas, su fraguado inicial y final se desarrolló lentamente. A continuación, en las Figura 72-Figura 76 se muestran los resultados experimentales de los tiempos de fraguado final representados en graficas para explicar mejor este comportamiento.

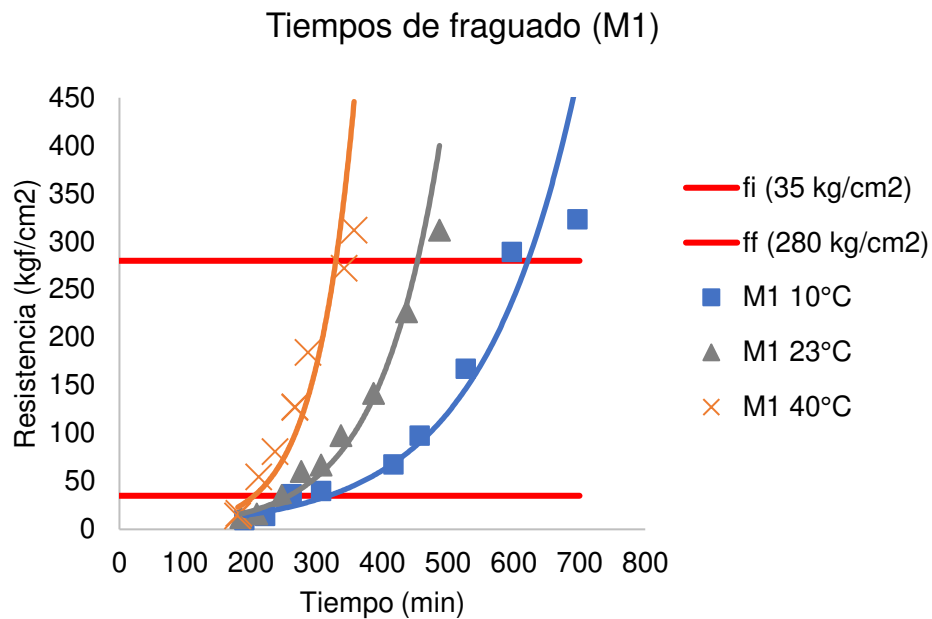


Figura 72. Tiempos de fraguado final M1

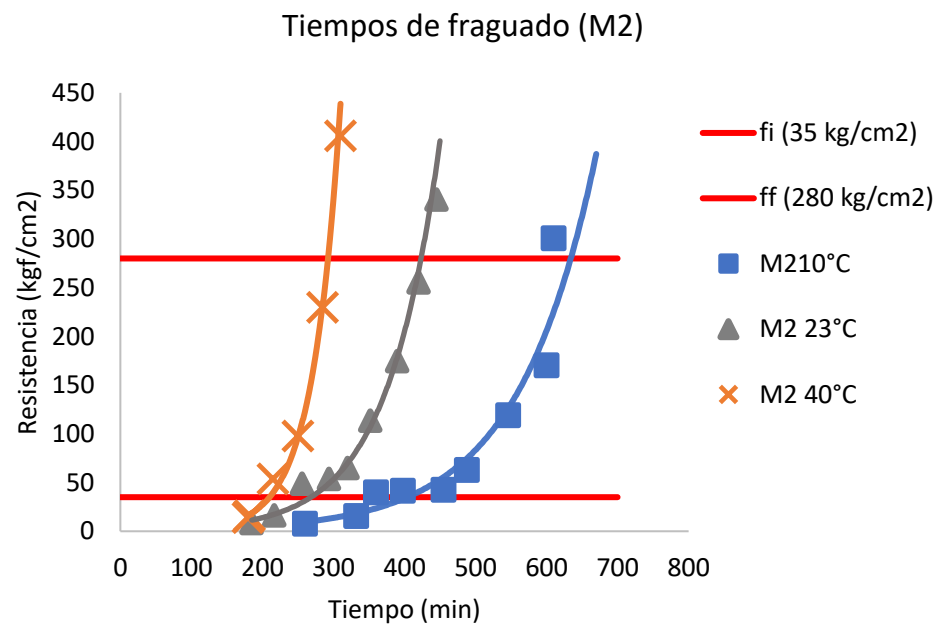


Figura 73. Tiempos de fraguado final M2

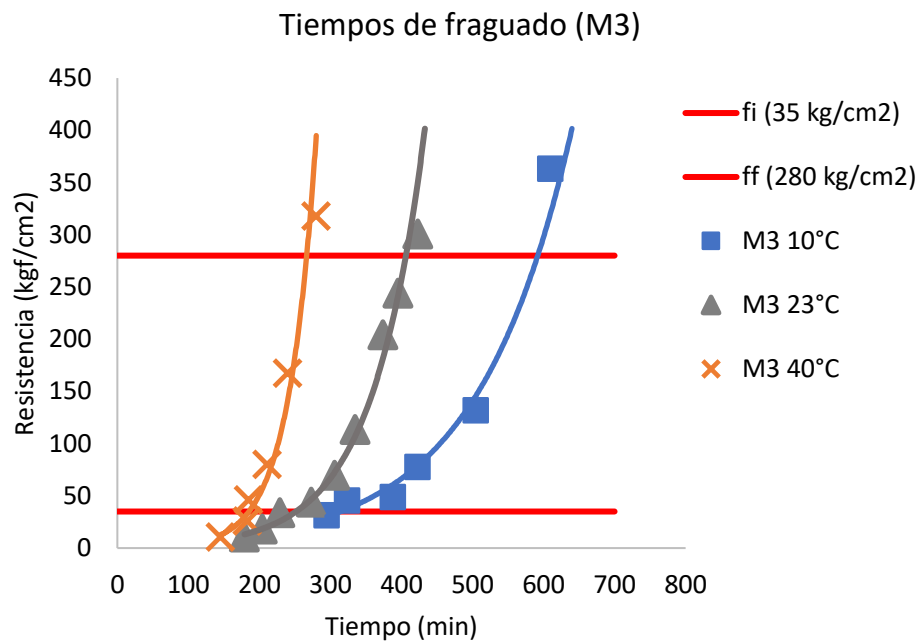


Figura 74. Tiempos de fraguado final M3.

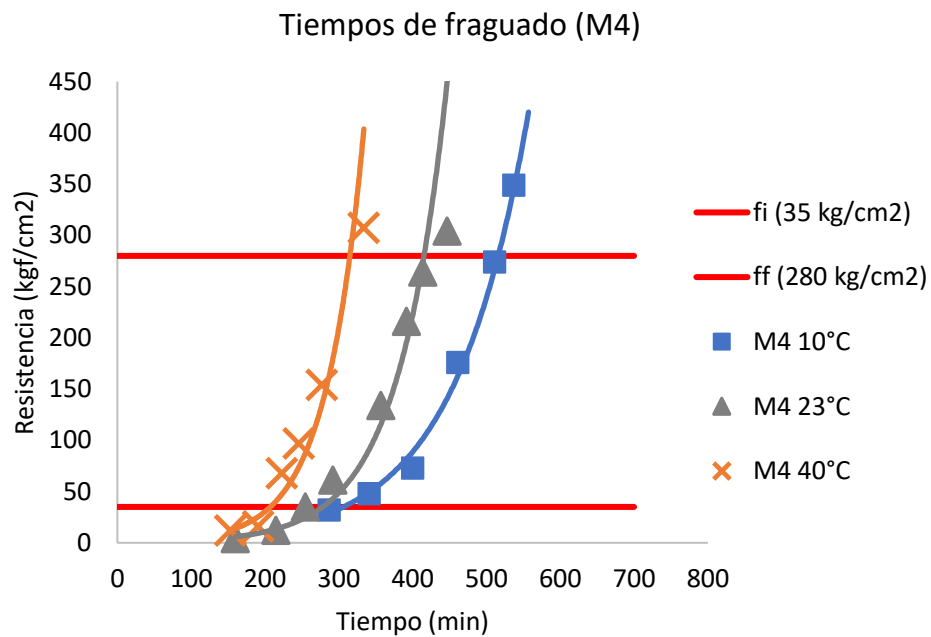


Figura 75. Tiempos de fraguado final M4

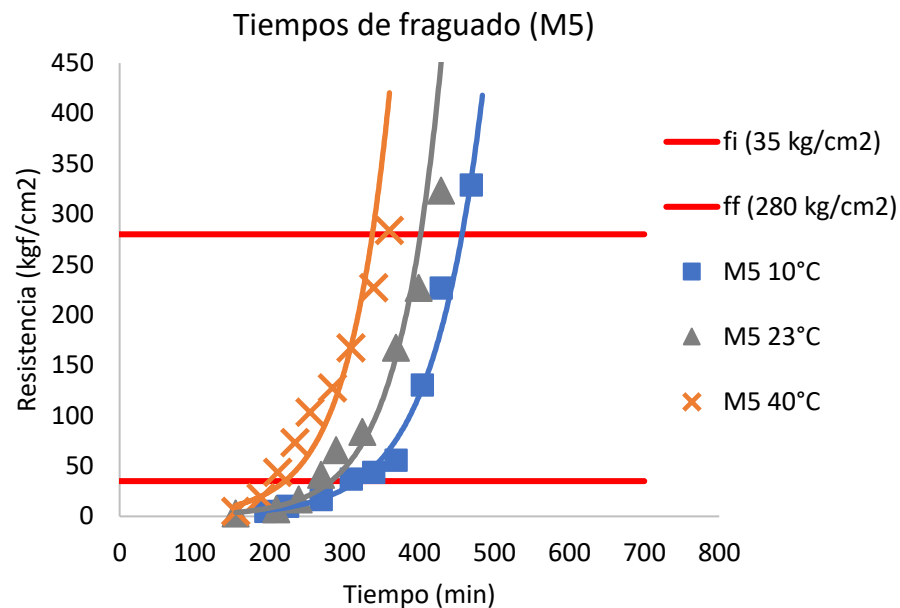


Figura 76. Tiempos de fraguado final M5

Los resultados muestran que para todas las curvas, las mezclas curadas a una temperatura de 10 °C el retraso del fraguado se presentó en casi el doble de tiempo del fraguado inicial, pero, los ensayos realizados a los cubos demuestran que solamente el retraso del fraguado nos indica una resistencia a la compresión baja a edades tempranas, y a edades posteriores la resistencia incrementa considerablemente hasta sobrepasar la resistencia de los cubos curados a 23 y 40°C.

Conociendo los tiempos de fraguado inicial y final de cada mezcla, se procede a determinar el dato de temperatura (T_0) a través de ensayos realizados a cubos

de mortero que representen la mezcla de cada diseño curados a la misma temperatura a la que se realizaron los ensayos de tiempo de fraguado, en este caso (10, 23 y 40 °C).

5.3.1.1. Resistencia a compresión en cubos de mortero equivalente

Tabla 12. Resistencia a la compresión de los cubos de mortero equivalente curados a 10, 23 y 40°C.

M1					
10°C		23°C		40°C	
Esfuerzo (Mpa)	Tiempo (hrs)	Esfuerzo (Mpa)	Tiempo (hrs)	Esfuerzo (Mpa)	Tiempo (hrs)
0	0	0	0	0	0
3.334	20.216	11.718	20.050	18.127	19.883
13.078	44.150	14.957	27.616	19.406	21.980
24.702	96.100	26.415	66.750	25.276	44.060
32.149	167.816	32.451	121.250	29.412	92.700
38.139	332.000	34.497	167.366	31.271	167.033
43.406	646.867	40.698	483.250	35.344	354.000
M2					
0	0	0	0	0	0
6.023	21.550	16.188	18.666	25.356	10.000
21.474	43.766	24.067	27.083	29.236	21.630
33.018	76.516	38.512	55.333	33.813	43.750
42.353	167.133	47.598	117.000	38.761	76.183
54.787	337.600	49.350	235.330	45.823	167.000
56.931	610.250	54.182	454.000	46.721	311.630
M3					
0	0	0	0	0	0
2.529	20.750	11.517	21.000	10.151	7.500
5.156	31.333	15.008	28.250	26.564	21.000
23.516	77.400	27.546	51.000	28.817	31.250
35.525	149.400	42.709	119.267	35.681	77.200
44.237	311.000	46.954	218.583	42.401	142.400

53.000	611.166	50.891	432.500	45.537	290.217
M4					
0	0	0	0	0	0
5.8624	19.550	25.044	17.860	13.954	7.967
13.1135	33.117	36.523	31.120	41.004	20.650
43.0622	70.367	51.773	53.657	58.172	33.633
59.2722	129.867	59.187	116.463	63.73	76.517
72.3234	263.317	67.681	218.527	66.54	156.950
M5					
0	0	0	0	0	0
7.973	21.817	33.781	21.583	5.600	4.583
17.203	30.467	39.293	28.450	56.507	22.083
41.419	43.000	58.003	53.580	66.520	44.933
66.207	95.867	66.526	121.483	74.247	96.200
76.795	193.333	70.135	214.233	76.100	193.033
87.000	483.233	82.000	429.117	79.851	336.000

Para una mejor apreciación de los resultados, a continuación, se muestran las gráficas del comportamiento de la temperatura sobre la resistencia a la compresión, en donde se puede apreciar claramente los efectos causados por las diferentes temperaturas de curado. En esta investigación estos resultados nos son de utilidad para poder determinar los parámetros que serán usados en las funciones de madurez.

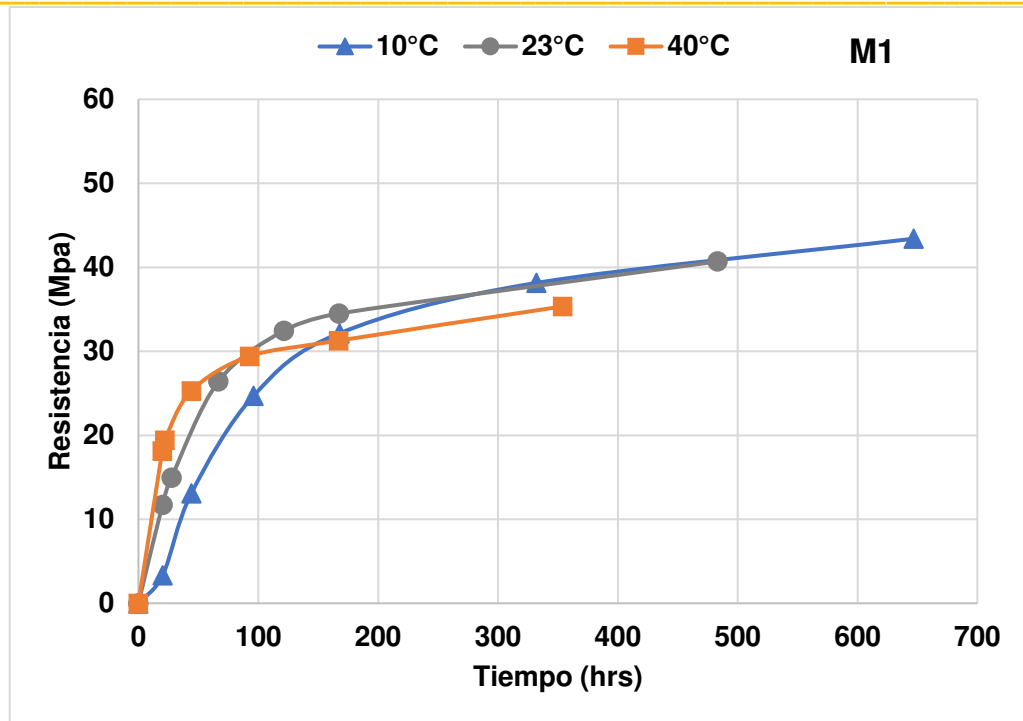


Figura 77. Efecto del curado a tres temperaturas (10, 23 y 49°C) M1

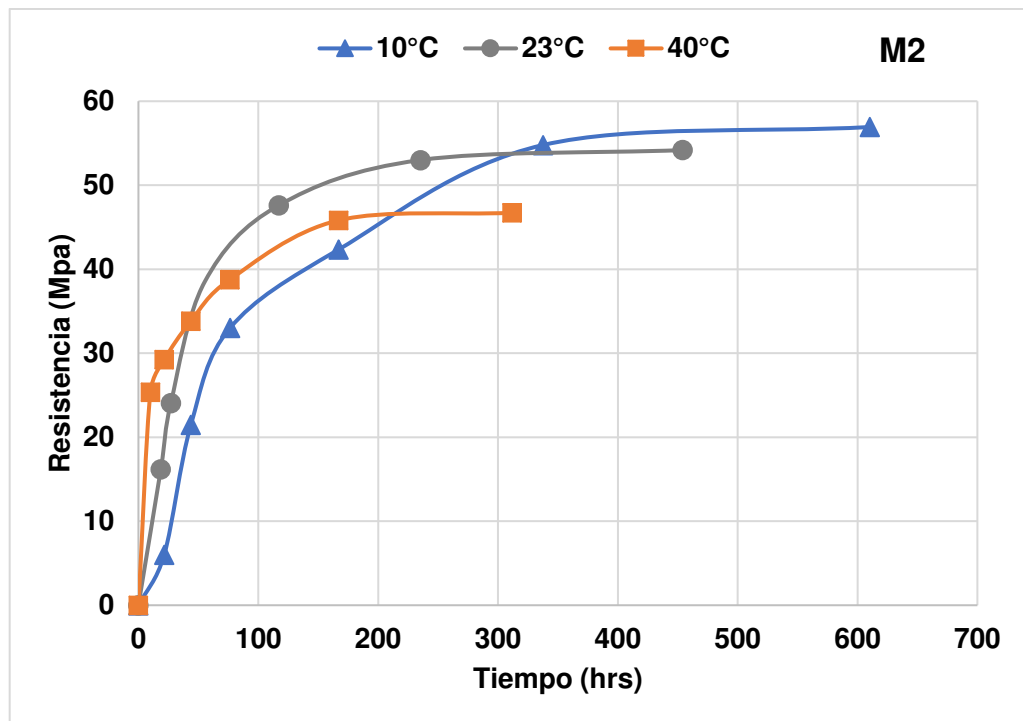


Figura 78. Efecto del curado a tres temperaturas (10, 23 y 49°C) M2

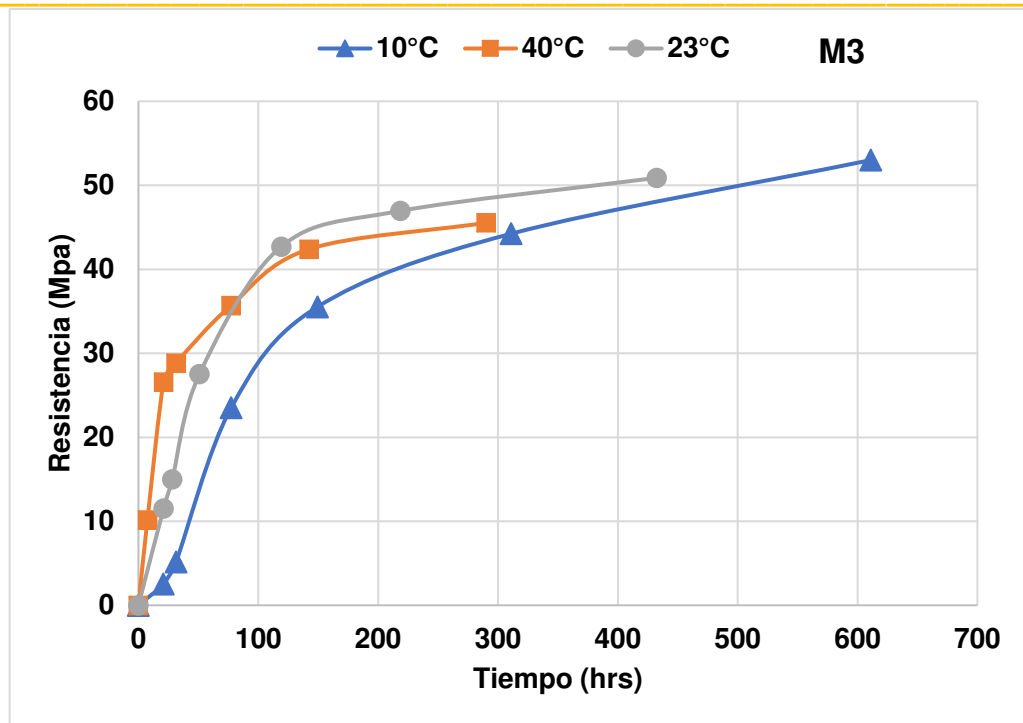


Figura 79. Efecto del curado a tres temperaturas (10, 23 y 49°C) M3.

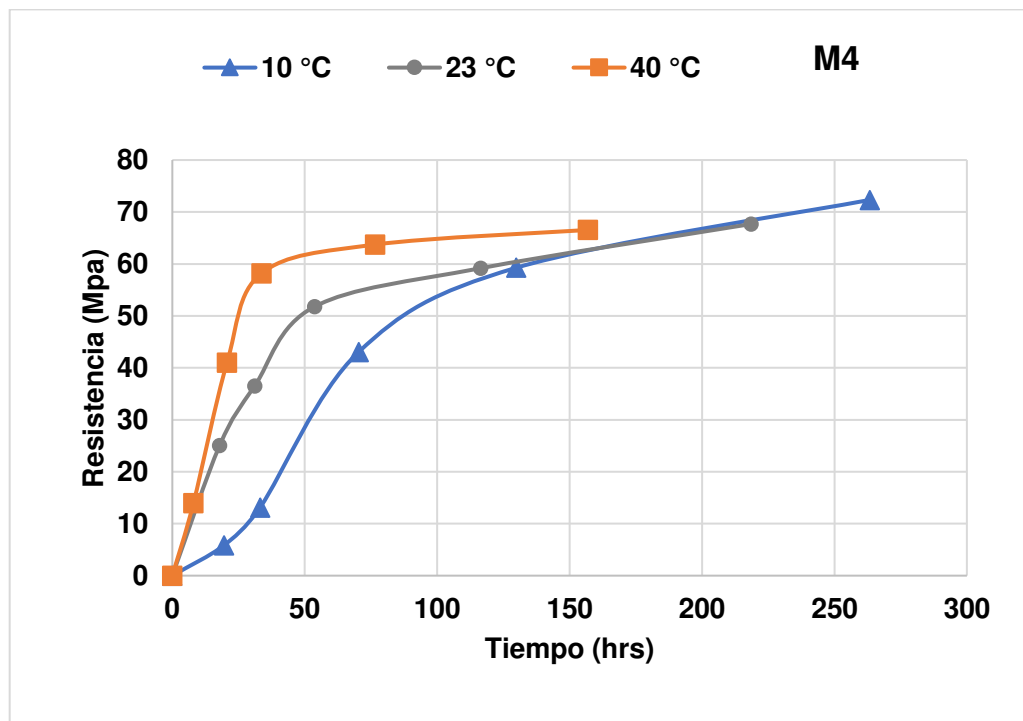


Figura 80. Efecto del curado a tres temperaturas (10, 23 y 49°C) M4.

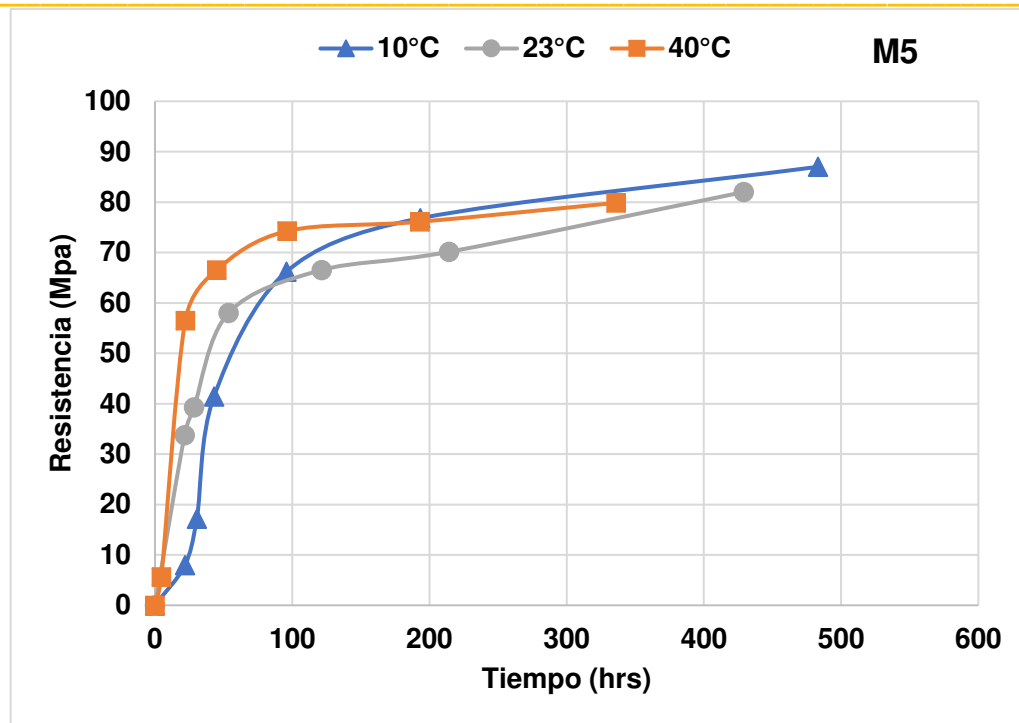


Figura 81. Efecto del curado a tres temperaturas (10, 23 y 49°C) M5

La influencia de la temperatura del concreto tiene un impacto importante sobre la resistencia inicial y final, en las gráficas de la resistencia de los cubos curados a tres temperaturas se pudo observar, que la resistencia obtenida a una temperatura a de 40°C, la resistencia inicial es alta, y por lo contrario, a temperaturas de 10 °C, la resistencia inicial es baja, pero conforme la edad va avanzando este efecto se hizo reversible, para las mezclas con temperatura alta, la ganancia de la resistencia se estabilizó y las que fueron curadas a una temperatura baja la resistencia a edad tardía incrementó, de tal manera que fue mayor que la temperatura estándar y la temperatura alta en este caso 23 y 40°C.

5.3.1.2. Registro de historial de temperaturas internas del concreto

El sensor de temperaturas que se embebió en los prismas fue monitoreado hasta una edad de los 28 días en intervalos de media hora (30 min) y 5 min, estos valores fueron gravados propiamente por el sistema y los guardó hasta la edad en que se quiera saber otro monitoreo. La muestra presentada en la Figura 82 es una representación y promedio de los tres termopares embebidos en las distintas zonas del prisma.

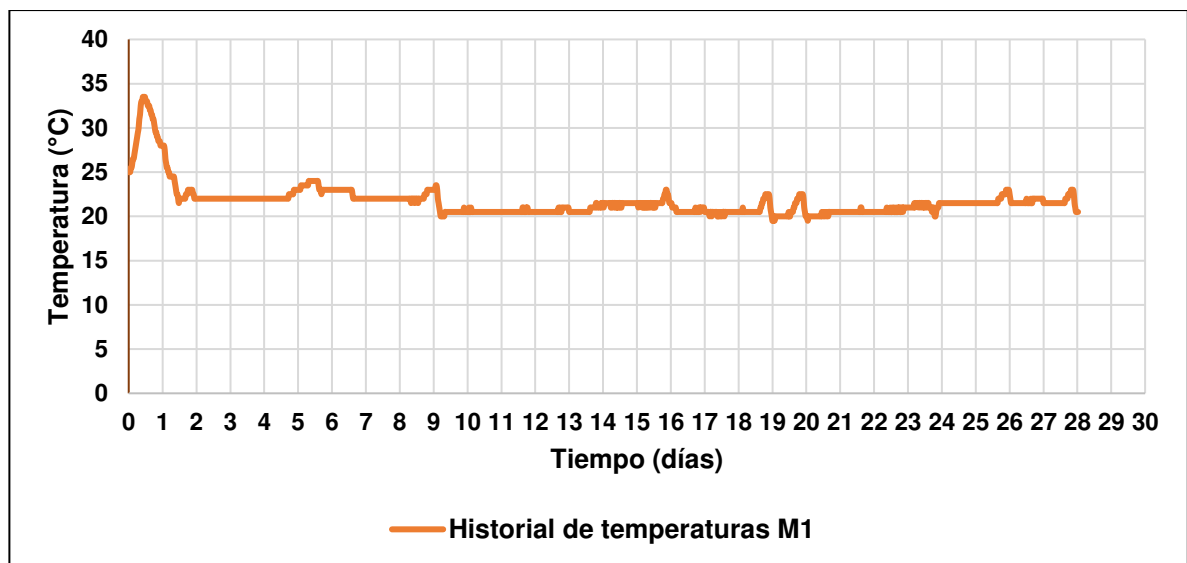


Figura 82. Monitoreo del historial de temperaturas de los moldes de concreto de 20 x 20 x 60 cm M1

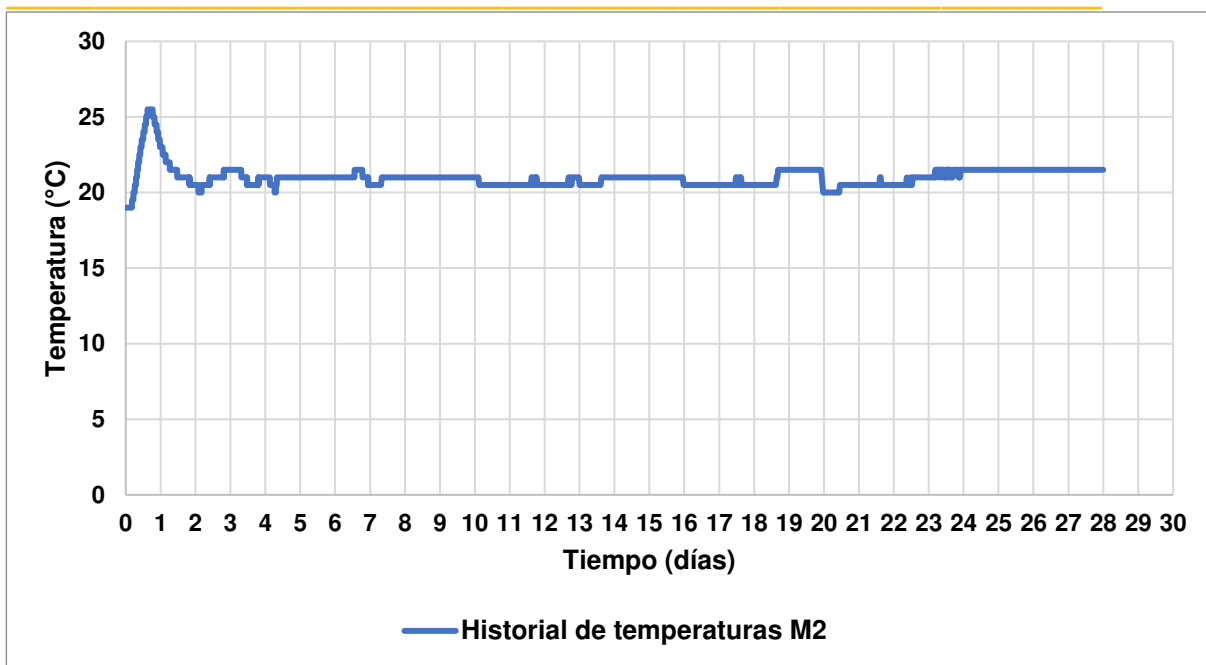


Figura 83. Monitoreo del historial de temperaturas de los moldes de concreto de 20 x
20 x 60 cm M2

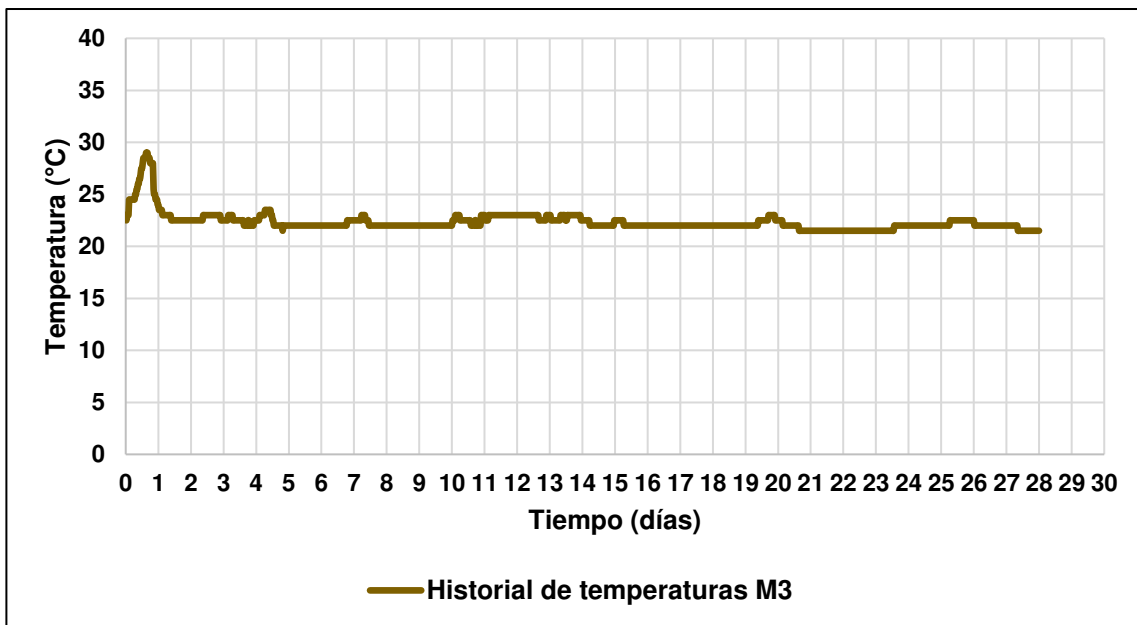


Figura 84. Monitoreo del historial de temperaturas de los moldes de concreto de 20 x
20 x 60 cm M3

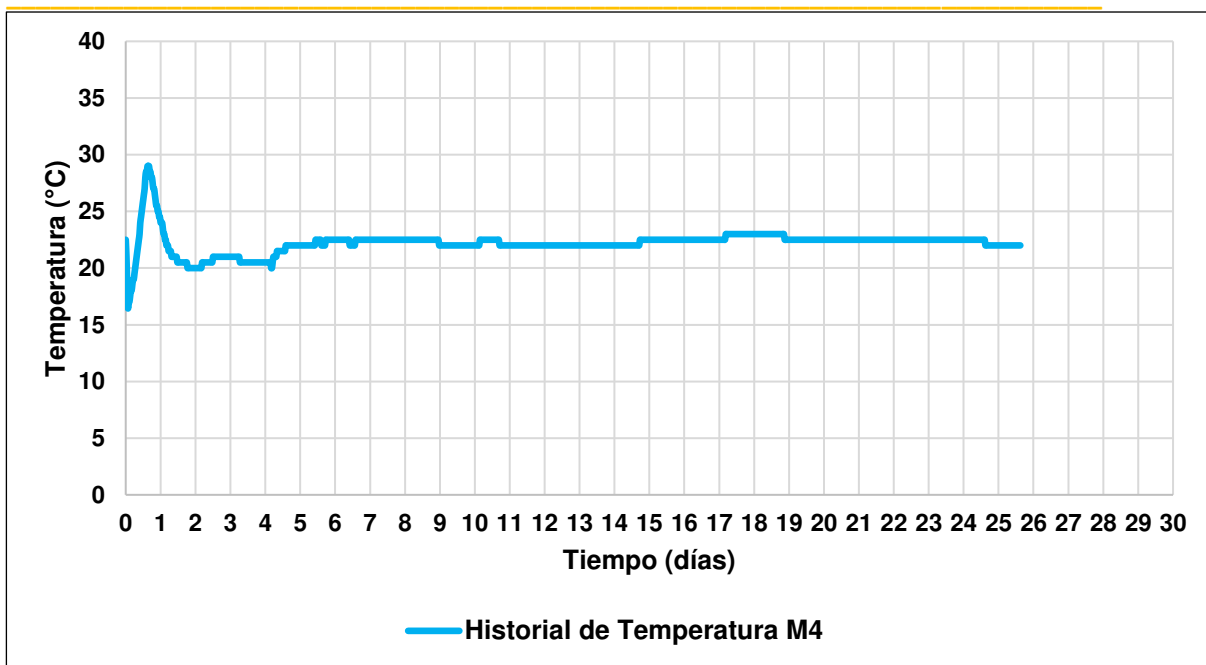


Figura 85. Monitoreo del historial de temperaturas de los moldes de concreto de 20 x
20 x 60 cm M4

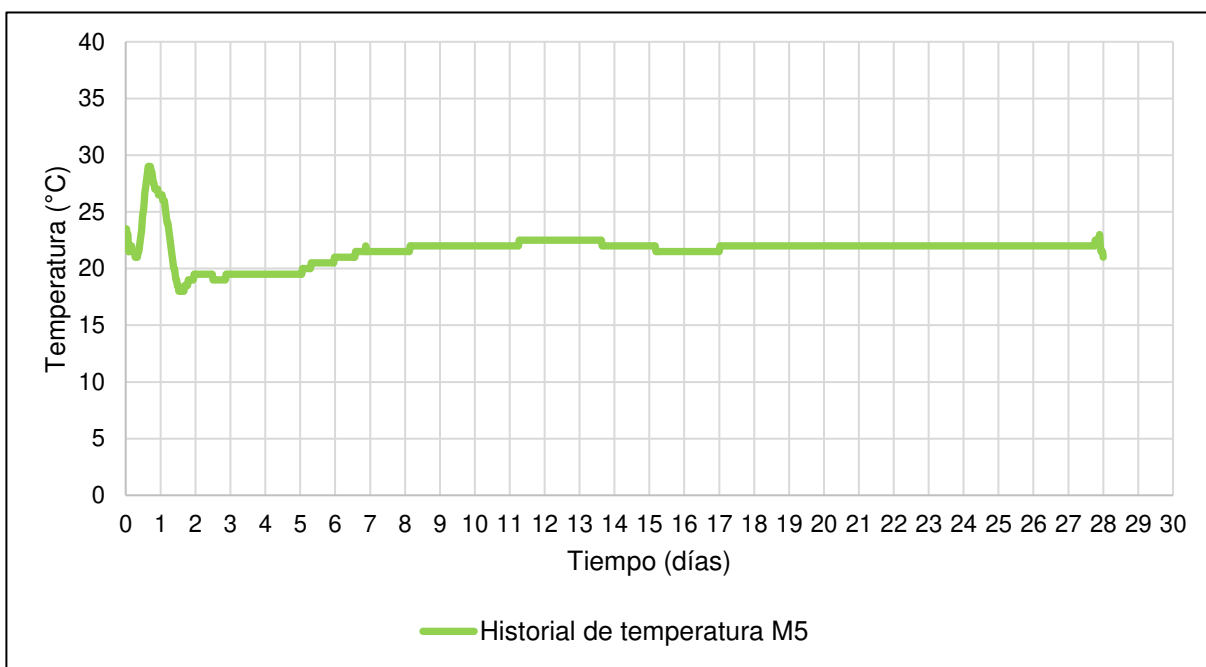


Figura 86. Monitoreo del historial de temperaturas de los moldes de concreto de 20 x 20 x
60 cm M5

En todos los casos la temperatura comenzó a estabilizarse en aproximadamente 24 horas y mantuvo un comportamiento constante de aproximadamente 23 °C que es la temperatura en la que los especímenes fueron curados.

Las temperaturas registradas corresponden al comportamiento típico del concreto en donde dentro de las primeras horas presentó un comportamiento de reposo y al iniciar la reacción de hidratación, la temperatura incrementó gradualmente.

Posteriormente se procedió a determinar la energía de activación E_a y el dato de temperatura de referencia T_0 a través de los procedimientos establecidos en la norma ASTM C 1074.

La mezcla M1 tuvo un mayor incremento de temperatura debido a que el colado se realizó alrededor de 25°C, es decir, 2°C más que M2, M3, M4, y M5. Es por eso por lo que la reacción de hidratación incrementó las primeras 12 horas hasta estabilizarse a 23°C, que es la temperatura la cual se llevó a curar el espécimen.

5.3.2. Determinación de la energía de activación y la temperatura de referencia

Existen varias maneras de determinar la E_a y el T_0 entre los que destacan son:

Cuando se conocen los tiempos de fraguado se aplica el procedimiento de la norma ASTM C1074 [49] poniendo atención del punto a1.1.7 (método 1), donde el valor de k es el inverso del tiempo de fraguado inicial (k_i) y fraguado final (k_f), en horas, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de k_i y k_f para aplicar la constante de crecimiento

Mezcla	Temperatura (°C)	Tiempos de fraguado				k_i (1/fraguado inicial)	k_f (1/fraguado final)
		inicial (min)	Final (min)	Inicial (hrs)	Final (hrs)		
M1	10.6	318	622	5.3	10.37	0.1887	0.0964
	23.4	258	454	4.3	7.56	0.2326	0.1323
	39.7	205	329	3.42	5.48	0.2924	0.1825
M2	10.2	404	634	6.75	10.56	0.1481	0.0947
	23.1	268	424	4.46	7.06	0.2242	0.1416
	40.5	210	292	3.5	4.86	0.2857	0.2058
M3	10.1	341	537	5.68	9.33	0.1761	0.1072
	23.1	252	406	4.2	6.76	0.2381	0.1479
	40.3	185	267	3.08	4.45	0.3247	0.2247
M4	9.8	321	486	5.35	8.1	0.1869	0.1235
	23.3	270	416	4.5	6.93	0.2222	0.1442
	40	201	294	3.35	4.9	0.2985	0.2041
M5	9.5	317	457	5.28	7.62	0.1894	0.1312
	23.4	282	402	4.7	6.7	0.2128	0.1493
	41	220	337	3.66	5.6	0.2732	0.1786

Por otro lado, en el punto A 1.1.8.2 (método 3), se gráfica el inverso de la resistencia de las últimas 4 edades de ensayo de los cubos curados a diferente temperatura, mostrados en la Tabla 12, contra el inverso de la edad real. Es muy

importante ser preciso en el cálculo de la edad real del mortero, teniendo en cuenta la hora exacta de la fabricación y ensayo. Los resultados encontrados a través de los métodos 1 y 3 de norma ASTM c1074 están establecidos de acuerdo a la norma ASTM C1074 y se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados de la temperatura dato (T_0) y energía de activación (E_a) para las 5 mezclas de referencia

Mezclas	T_0 (°C)			Q (°K)			$E_a=QR$ (J/mol)		
	Método (fi)	Método (ff)	Método 3 ASTM C1074	Método (fi)	Método (ff)	Método 3 ASTM C1074	Método (fi)	Método (ff)	Método 3 ASTM C1074
M1	-41.72	-21.43	10.75	1292	1879	1521	10741	15622	12647
M2	-24.24	-15.46	7.87	1902	2264	2349	15813	18822	19524
M3	-25.63	-16.38	-1.51	1973	2176	5465	16403	18091	45440
M4	-39.19	-33.81	10.05	1382	1489	1286	11490	12380	10692
M5	-58.78	-77.2	4.86	1085	907	5345	9020	7540	44438

5.3.3. Predicciones de la resistencia a la compresión con las funciones de madurez

5.3.3.1. Resultados de la Función de madurez (Nurse-Saúl).

Esta función es una de las más utilizadas por usuarios que optan por usar el método de madurez en sus trabajos de campo, pero existen ligeras variaciones dependiendo del método empleado para determinar el T_0 , en la Figura 87 podemos apreciar que la predicción de la resistencia utilizando el método 3 de la

ASTM C1074 es un 30% mayor que el método del fraguado final (ff), y un 45% mayor que el método de fraguado inicial (fi). En estos casos, la predicción se presentó de manera más acelerada.

Por otro lado, comparando el método del fraguado final (ff) con el método del fraguado inicial (fi) en los puntos de más diferencia se pudo encontrar un 9% entre ellos lo que significa que son muy aproximados y con una diferencia aceptable entre sí. Y a una madurez de 10,000 °C-hr las predicciones de la resistencia se comienzan a estabilizar sin presentar variación alguna, llegando hasta el 100% de la resistencia máxima de compresión y la fuerza de extracción.

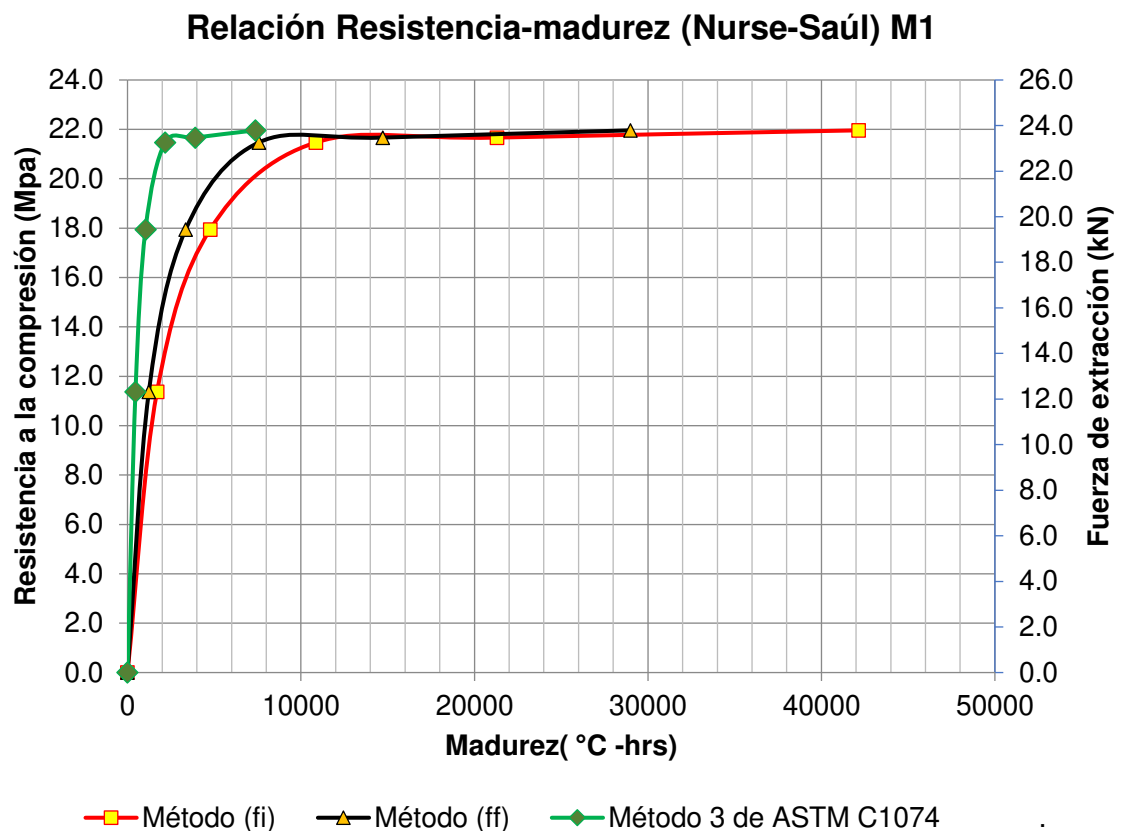


Figura 87. Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M1

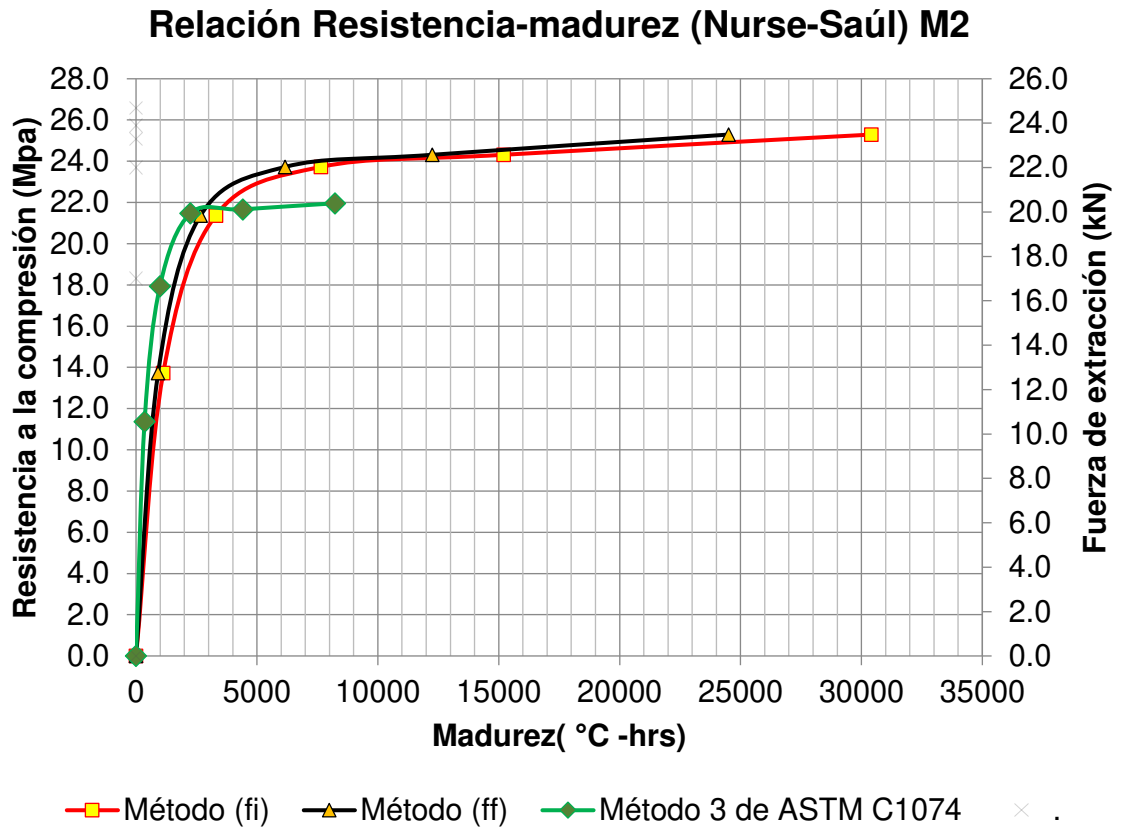


Figura 88. Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M2

En el caso de la mezcla M2 mostrada en la Figura 88 los valores de predicción evaluados en el punto más alejado muestran una diferencia de un 5 %, los valores de los métodos (fi) y (ff) siguen una tendencia con una diferencia de menos del 1% entre sí hasta el final de la predicción, más sin embargo, el valor de predicción evaluado con el método 3 de la ASTM C1074 tiene una caída al 80% de la resistencia total de la predicción y continua constante a ese valor.

Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M3

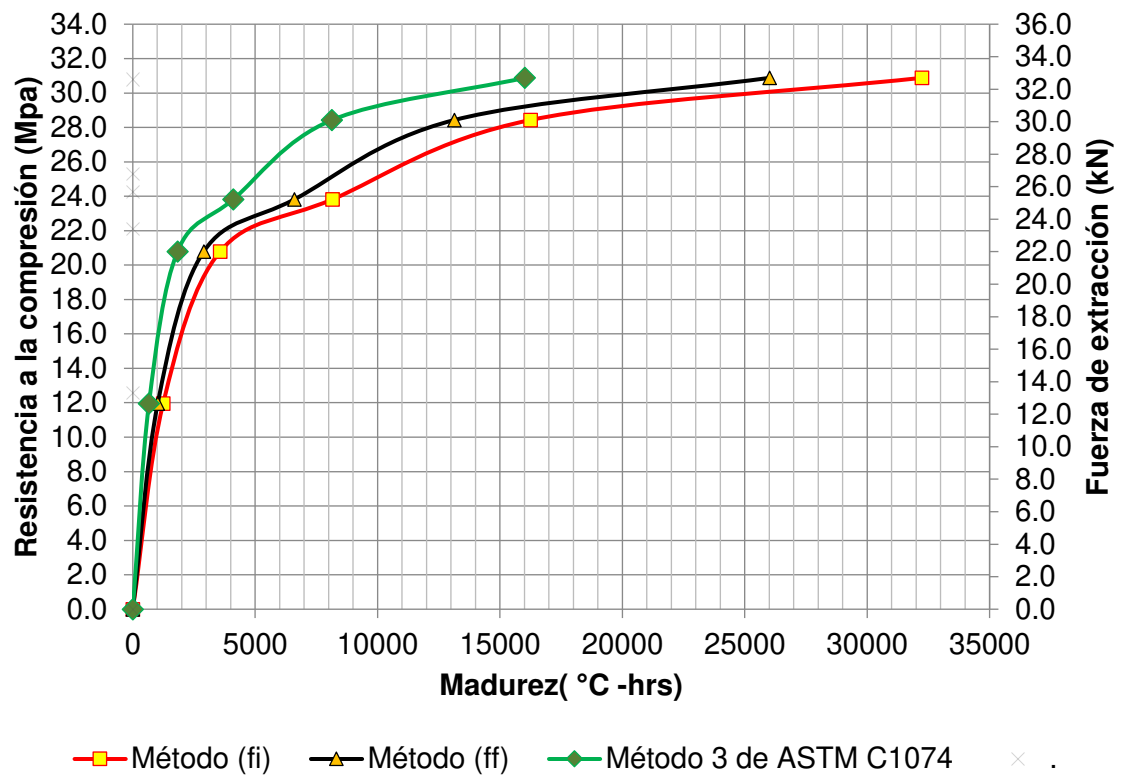


Figura 89. Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M3

La Figura 89 se presentó un 17% de diferencia en la predicción ubicada en el punto más alejado entre la relación obtenida con el método 3 de la ASTM C1074 y el método de (fi), y un 10 % con el método de (ff). Para el caso de (fi) y (ff) las diferencias no oscilaron en más del 2.5% alrededor de toda la predicción, esto una vez más demuestra que estos dos métodos son más precisos entre sí con un rango de error mínimo.

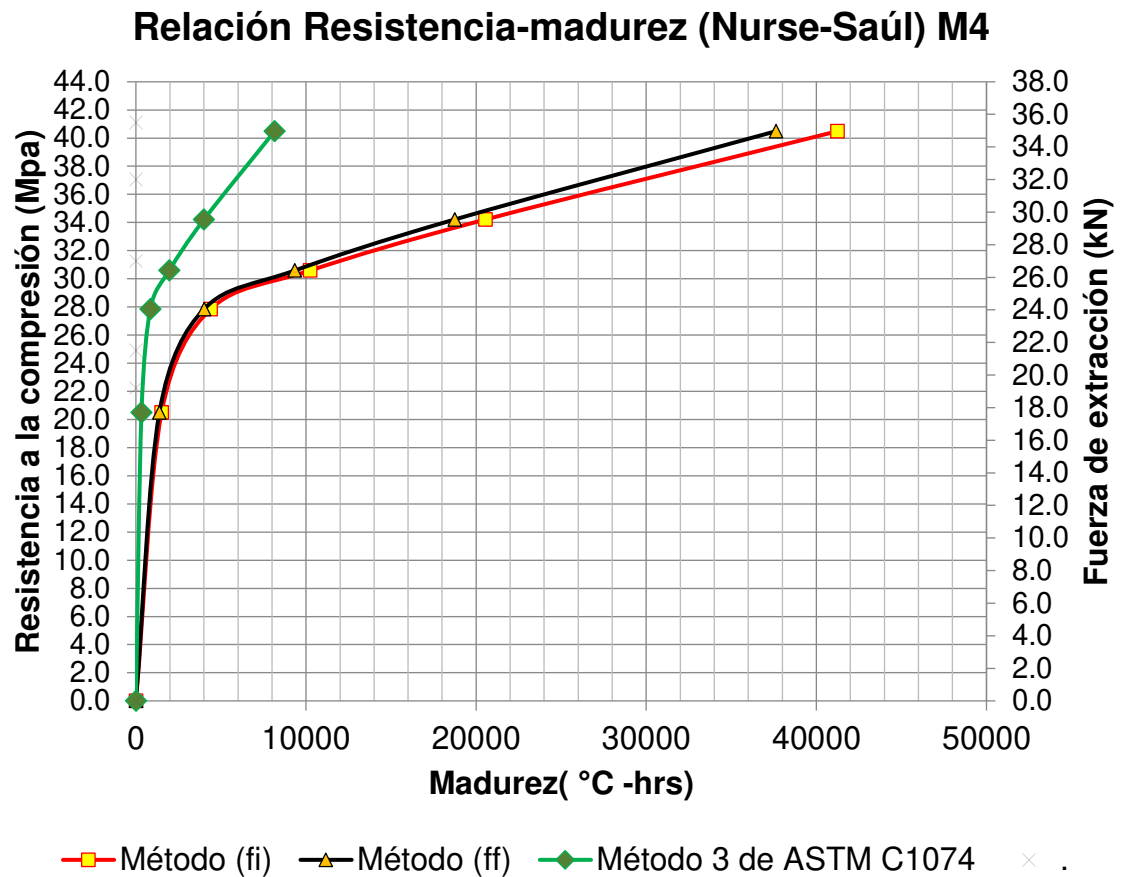


Figura 90. Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M4

Para la Figura 90 de la mezcla M4 presentó una gran variación desde el inicio del comportamiento de la curva, los valores de predicción del método 3 de la ASTM C1074 se dispararon hasta más de un 25% con respecto a los otros dos métodos, es decir el comportamiento de la predicción llegó a un 100% de la resistencia máxima en un 80% más rápido que los otros métodos (fi) y (ff).

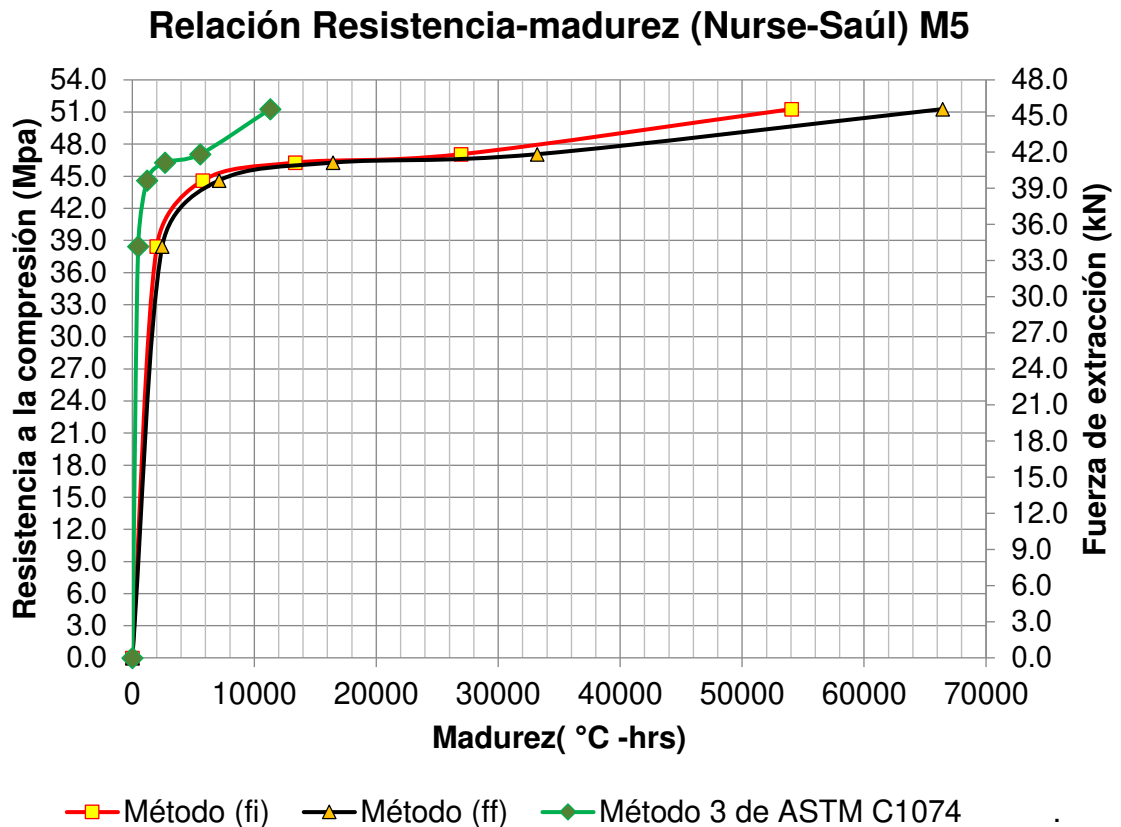


Figura 91. Relación Resistencia-madurez (Nurse-Saúl) M5

En el caso de la mezcla mostrada en la Figura 91 , el valor de predicción máximo por el método 3 de ASTM C1074, se quedó por debajo de lo predicho por los métodos de (fi) y (ff). Los valores de los métodos de (fi) y (ff) siempre se mantuvieron con una tendencia lógica que tuvo variaciones mínimas que no representan una diferencia significativa, es decir los valores redundaron alrededor del 1% en este caso.

Después de apreciar los diferentes diseños de mezclas evaluados por los métodos de madurez por la ecuación de predicción Nurse-Saul, se ha demostrado que los métodos sugeridos por la norma en la sección a1.1.7 son eficientes para este modelo, ya que las variaciones presentadas no son mayores a 10% de la resistencia del concreto evaluado por las predicciones de la norma ASTM C1071.

5.3.3.2. Resultados de edad equivalente basados en la ecuación de Arrhenius

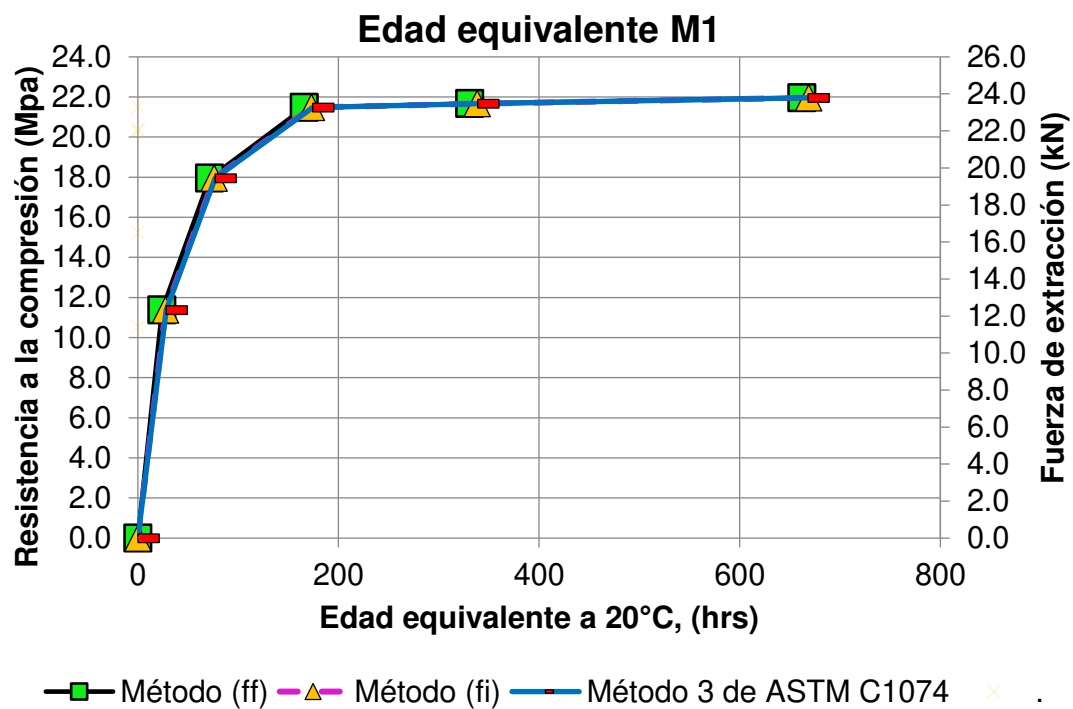


Figura 92. Resistencia obtenida a partir de la edad equivalente te M1

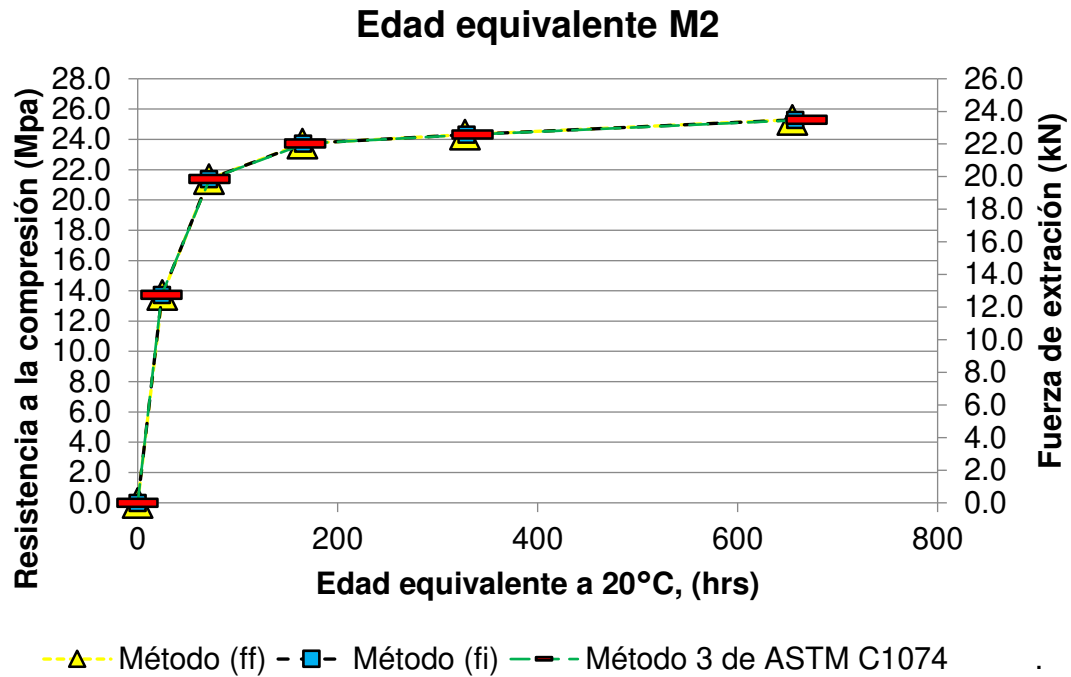


Figura 93. Resistencia obtenida a partir de la edad equivalente te M2

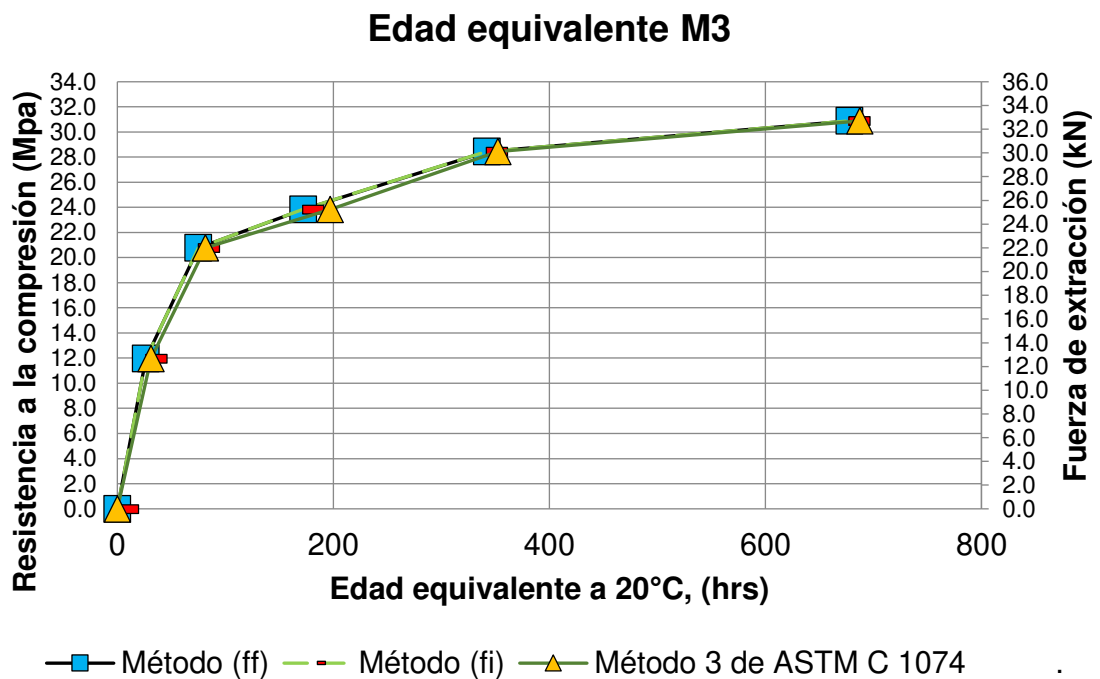


Figura 94. Resistencia obtenida a partir de la edad equivalente te M3

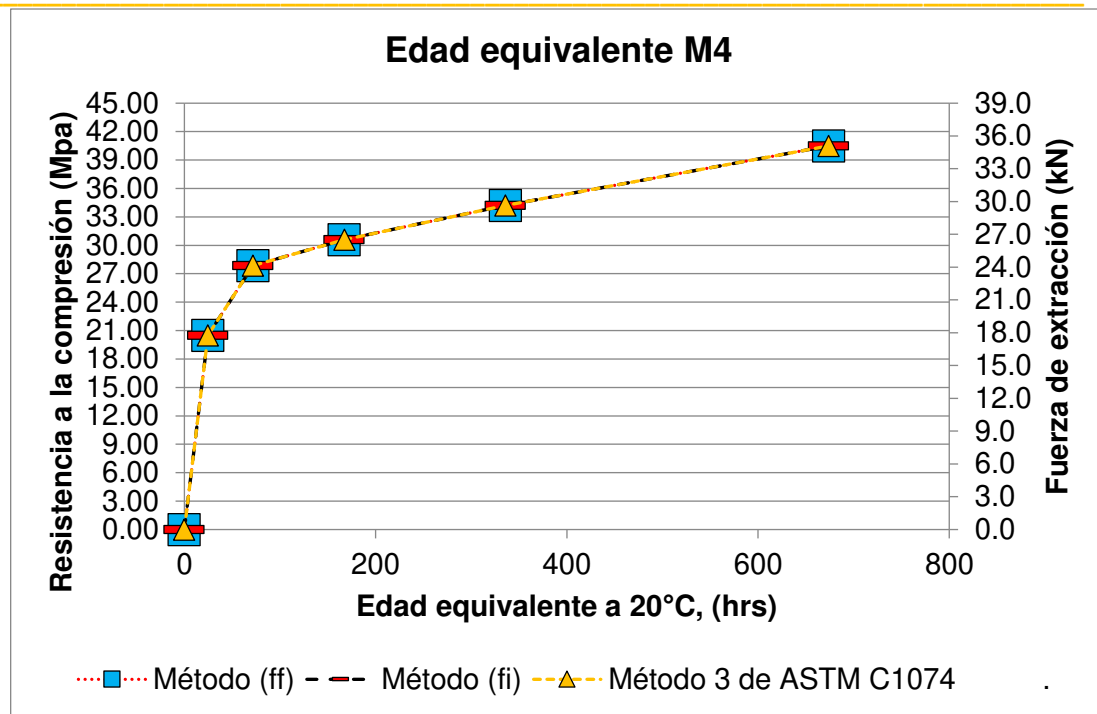


Figura 95. Resistencia obtenida a partir de la edad equivalente te M4

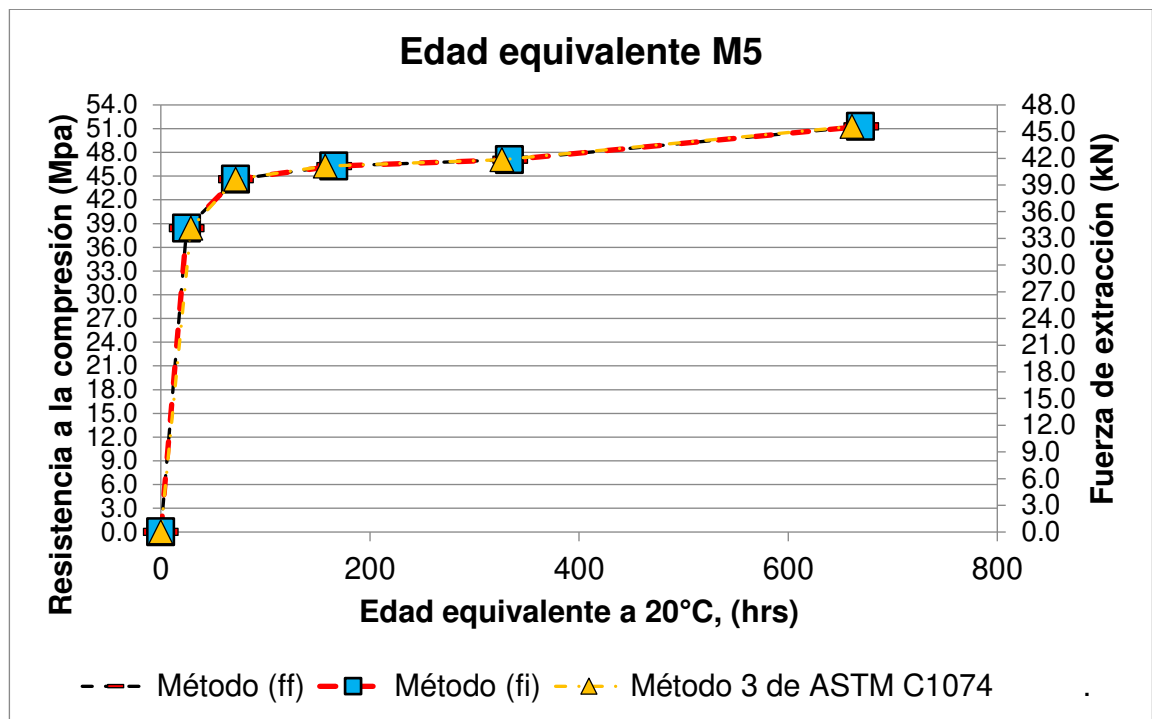


Figura 96. Resistencia obtenida a partir de la edad equivalente te M5

Para las mezclas presentadas en las Figura 92-Figura 96 se observó que con los métodos (fi) y (ff) los valores obtenidos de E_a , en la ecuación de Arrhenius se comportaron de manera similar en todos los casos, presentando variaciones de menos del 0.5%, esto lo hace un método sumamente confiable para ser aplicado en la industria y predecir la ganancia de resistencia basada por mediciones de temperatura que desarrolla el concreto internamente a través del tiempo.

CAPITULO 6

6. Conclusiones y recomendaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo se presentan las siguientes conclusiones:

Mezclas de control

- Los diseños empleados llevaron consumos de cemento que van desde 220, 250, 270, 400 y 490 kg/m³; para las resistencias potenciales del cilindro a los 28 días de 200, 250, 300, 400 y 500 kg/cm² respectivamente, y las relaciones a/c optimas utilizadas fueron desde 0.65, 0.6, 0.55, 0.35 y 0.3.
- Las mezclas con una relación a/c relativamente bajas (0.35 y 0.3) necesitaron más consumo de aditivo, debido a que eran muy viscosas y poco trabajables. Se optó por aumentar la fluidez, esto también con el objetivo de obtener una mezcla en la que se facilitara el tamizado en húmedo para obtener una mezcla representativa de un mortero equivalente y así determinar los tiempos de fraguado con el método ASTM C403.

Resistencia a la compresión

- Para todas las mezclas se pudo observar que la resistencia a la compresión obtenida a través de los núcleos de 2 in (4.5 cm) tuvo una desviación estándar alta, esto se puede atribuir debido a factores importantes como: la extracción del núcleo, la compactación, el tamaño máximo del agregado, el corte en húmedo por aserrado, así como el

cabeceo de los especímenes; esto tiene una influencia importante sobre la resistencia a la compresión del concreto que debido a la gran desviación estándar presentada lo evidencia.

- Para la resistencia obtenida de los núcleos de 3 in (6.9 cm) la desviación estándar fue menor en comparación que la obtenida de los núcleos de 2 in (4.5 cm) esto se puede atribuir a que el tamaño del espécimen aumentó y por consecuencia hubo mejor interacción entre la pasta y el agregado, pero, aun así, la desviación estándar fue alta comparada con la obtenida con los cilindros de 10 x 20 cm.
- El ensayo de núcleos de concreto es un buen método para estimar la resistencia del concreto en el lugar debido a que, a pesar de tener una desviación estándar alta, tienen una buena correlación con los cilindros, con un coeficiente de correlación de $R=0.97$ para núcleos de 2 in (4.5 cm) y $R=.985$ para núcleos de 3 in (6.9 cm).
- Los núcleos de 2 in (4.5 cm) vs núcleos de 3 in (6.9 cm) presentan un buen coeficiente de correlación $R=0.9793$. Estas correlaciones se obtuvieron incluyendo los valores de las desviaciones estándar.

Correlaciones de la resistencia a la compresión y la fuerza de extracción

- La fuerza de extracción obtenida con la prueba LOK-TEST obtuvo alrededor de un 6% de variación, y las correlaciones obtenidas con los cilindros estándar son las que mejores resultados presentaron con un

coeficiente de correlación de $R^2=0.96$, lo que demuestra que esta prueba tiene una buena aproximación y buena correlación con los cilindros elaborados y curados en laboratorio.

- A pesar de los posibles defectos que se pudieron presentar en los núcleos después de la extracción hasta la preparación del ensayo, los resultados presentaron una buena correlación con la fuerza de extracción $R=0.94$ y 0.95 para 2 y 3 in (4.5 y 6.9 cm) respectivamente.
- En comparación con la literatura para los cilindros de 10 x 20 cm, existe una variación del 6% con la correlación obtenida de los núcleos de 3 in (6.9 cm). Para los núcleos de 2 in (4.5 cm) hubo una variación del 8%. En ambos casos las variaciones estuvieron por debajo de la resistencia que se presenta en los cilindros elaborados con procedimientos estándar, sin embargo, al igual que en los cilindros, la prueba de extracción demuestra que es un método eficiente para estimar las condiciones reales que se presentan en alguna estructura ya que el valor de correlación corresponde a un 96% de confiabilidad en el caso de la resistencia a la compresión.
- La prueba LOK-TEST basada en los resultados encontrados, puede sin problema alguno sustituir a los cilindros sometidos a condiciones de laboratorio controladas; esto debido a la variación máxima de un 6%, lo que demuestra que los resultados son alentadores para practicas futuras en campo. El mismo panorama se presenta con los núcleos de 2 y 3 in.

Tiempos de fraguado del concreto

- Los tiempos de fraguado para la todas las mezclas curadas a una temperatura de 10 °C retrasaron el fraguado final en un tiempo de hasta 10.37 horas, pero los ensayos realizados a los cubos demuestran que solamente el retraso del fraguado presenta una resistencia a la compresión baja a edades tempranas, y a edades posteriores la resistencia incrementa bruscamente.

Método de madurez

- La influencia de la temperatura del concreto tiene un impacto importante sobre la resistencia inicial y final, la resistencia de los cubos curados a tres temperaturas se pudo concluir que la resistencia obtenida a la temperatura de 40°C, la resistencia inicial es alta, y, por lo contrario, a temperaturas bajas (10°C), la resistencia inicial es baja, pero conforme la edad va avanzando este efecto es reversible. Las mezclas curadas a una alta temperatura tuvieron una tendencia a estabilizarse en la ganancia de la resistencia y permanecieron constantes y sin incrementos, y las que fueron curadas a una temperatura baja las resistencias a edades tardías incrementaron, de tal manera que fueron mayores que las mezclas curadas a temperatura estándar. La temperatura estándar fue de 23°C y la temperatura de curado alta fue de 40°C.

- La temperatura del concreto se estabilizó en los moldes en los cuales fue embebido el termopar a una edad de 12 horas aproximadamente y la temperatura que siguió fue la del cuarto de curado de 23°C.
- Los valores de E_a obtenidos experimentalmente por varios métodos mostrados en la ASTM C1074 son valores que se encontraron en el rango correspondiente entre datos reportados con anterioridad mostrados en la Tabla 4 y Tabla 3. En el presente estudio este rango de valores de E_a utilizados está dentro de los valores predeterminados que se han encontrado dentro de la literatura.
- Los datos de temperatura T_0 encontrados experimentalmente a través de los 3 métodos utilizados en la literatura, dieron un acercamiento hacia los datos mostrados en la Tabla 3 que corresponden a valores que se han reportado en la literatura, es por eso por lo que se optó por utilizar los valores experimentales encontrados.

Resultados de la función de madurez (Nurse-Saul)

- Para la M1 la predicción del método de madurez por la ecuación de Nurse-Saul obtenida por el método 3 de la norma ASTM C1074 es un 30% mayor que el del (ff) y 45% que el del (fi). El método (fi) y (ff) tuvo una diferencia mínima de un 9% entre ellas y su comportamiento fue muy similar.
- Para la M2 las curvas de madurez de los métodos (fi) y (ff) tuvieron un error de menos del 1% entre cada comportamiento.

- Para la M3 el comportamiento de los 3 métodos fue muy similar existiendo solamente un rango del 17% entre los puntos más alejados de las gráficas entre el método 3 del ASTM C1074 y el método (ff) y por lo contrario para los métodos (ff) y (fi) no existe una variación considerable.
- La mezcla M4 tuvo un 25% de diferencias de los valores de predicción del método 3 de la ASTM 1074 con los valores de (fi) y (ff) respectivamente. Como en todos los casos se logró observar que el comportamiento de las mezclas de madurez obtenidas a partir de los métodos de (fi) y (ff) es completamente parecido lo que los hace un método confiable para estimar la resistencia.

Resultados de la edad equivalente obtenida por la ecuación de Arrhenius.

- Los métodos (fi) y (ff) los valores obtenidos de E_a , en la ecuación de Arrhenius se comportaron de manera similar en todos los casos, presentando variaciones de menos del 0.5%, esto lo hace un método tentativamente confiable.
- El proyecto consistió en evaluar a todos los especímenes bajo un método de curado estándar, por lo que los resultados solamente se limitan a pruebas de laboratorio. Es por eso por lo que se optó por proponer algunas recomendaciones.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a lo realizado se establecieron las siguientes recomendaciones que serán de gran utilidad para mejorar trabajos futuros:

- Se recomienda utilizar otro aditivo superplastificante que le proporcione a la mezcla una fluidez y una viscosidad adecuada para facilitar el manejo del concreto.
- El proyecto de investigación se limitó solamente a un trabajo experimental dentro de laboratorio, es por eso por lo que es recomendable que se reproduzcan estas mezclas en una estructura real y aplicar las correlaciones encontradas que permitan establecer la efectividad de estas pruebas, evaluando la variabilidad y el entorno al que fueron sometidos dichos elementos.
- Por otra parte, se recomienda reproducir el método de madurez en una estructura que represente los diferentes los comportamientos de temperatura en distintos puntos de la estructura, con la finalidad de evaluar las variaciones en la concentración de temperatura del elemento, puesto que el desarrollo de la temperatura se comporta diferente en cada punto evaluado de la estructura. Es por eso la necesidad de calibrar estos métodos a estructuras reales ya que, en la realidad, se evalúan más parámetros que no se controlan fácilmente.
- En el caso de la prueba de extracción “Pull-Out” LOK-TEST, es recomendable instrumentar un elemento con insertos para evaluar el

método en una aplicación de campo en donde intervienen las condiciones reales que afectan o benefician a la estructura.

- Para futuros trabajos se puede complementar este trabajo utilizando otros métodos no destructivos que nos brinden más correlaciones para evaluar y comparar los resultados obtenidos con las pruebas no destructivas.
- Se sugiere implementar núcleos de 4 in (10 cm) puesto que se ha demostrado que brindan resultados más confiables y más representativos comparados con los cilindros de 10 x 20 cm.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- [1] A. Brencich, «A post-installed insert for pull-out tests on concrete up to 70 MPa,» *Construction and Building Materials*, vol. 95, nº 1, pp. 788-801, 2015.
- [2] V. M. Malhotra y N. J. Carino, «Handbook on nondestructive testing of concrete,» segunda ed., 2004, pp. 1-13.
- [3] C. G. Petersen, «LOK-TEST and CAPO-TEST Pullout Testing, Twenty Years Experience,» *NDT in Civil Engineering Conference*, pp. 1-19, 1997.
- [4] P. Kierkegaard-Hansen, «Lok-Strength,» *Nordisk Betong*, nº 3, pp. 19-28, 1975.
- [5] A. Mpalaskas, I. Vasilakos, T. Matikas, H. Chai y D. Aggelis, «Monitoring of the fracture mechanisms induced by pull-out and compression in concrete,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 128, pp. 219-230, 2014.
- [6] N. J. Carino, «Chapter 19. Nondestructive Test Methods,» *Concrete Construction Engineering Handbook*, pp. 1-68, 1997.
- [7] J. H. Bungey y M. N. Soutsos, «Reliability of Partially Destructive Test to Assess the Strength of Concrete on Site,» *Construction and Building Materials*, vol. 15, nº 2-3, pp. 81-92, 2001.
- [8] P. Kierkegaard-Hansen y J. A. Bickley, «In-Situ Strength Evaluation of Concrete by the Lok-Test System,» *American Concrete Institute*, 1978.
- [9] L. Hubler, «Developer Saves Time, Reduces Interest Costs with New Concrete Testing System.,» *Canadian Building Magazine*, pp. 1-3, 1982.
- [10] V. M. Malhotra y G. Carette, «Comparison of Pullout Strength of Concrete with Compressive Strength of Cylinder and Cores, Pulse Velocity, and Rebound Number,» *ACI Journal*, vol. 77, nº 3, pp. 161-170, 1980.
- [11] N. J. Carino, «Handbook on Nondestructive Testing Concrete,» *Chapter 3*, pp. 1-36, 1991.
- [12] W. C. Stone y N. J. Carino, «Deformation and Failure in Large-Scale Pullout Tests,» *ACI Journal*, vol. 80, nº 6, pp. 501-5013, 1983.
- [13] W. C. Stone y N. J. Carino, «Comparison of analytical with experimental strain distribution for the pullout test,» *ACI journal*, vol. 81, nº 1, pp. 3-12, 1984.

- [14] H. Krenchel y S. P. Shah, «Fracture Analysis of the Pullout Test,» *Materiaux et Constructions*, vol. 18, nº 108, pp. 439-446, 1985.
- [15] H. Krenchel y J. A. Bickley, «Pullout Test of Concrete: Historical Background and Scientific Level Today,» *Nordisk Betong Publication*, nº 6, pp. 155-168, 1987.
- [16] H. Krenchel y J. A. Bickley, «Pullout Test of Concrete: Historical Background and Scientific Level Today,» *Nordisk Betong*, nº 6, pp. 155-168, 1987.
- [17] J. A. Bickley, «The Variability of Pullout Tests and In-Place Concrete Strength.,» *Concrete International*, vol. 5, nº 14, pp. 44-50, 1982.
- [18] W. C. Stone, N. J. Carino y C. P. Reeve, «Statistical Methods for In-Place Strength Prediction by the Pullout Test,» *ACI Journal*, vol. 83, nº 5, pp. 745-757, 1986.
- [19] ACI 228.1R-03, «In-Place Methods to Estimate Concrete Strength,» de *Reported by ACI Committee 228*, 2003, pp. 1-44.
- [20] W. C. Stone y B. J. Giza, «The Effects of Geometry and Aggregates on the Reliability of the Pullout Test,» *Concrete International*, vol. 7, nº 2, pp. 27-36, 1985.
- [21] ASTM C 900, «Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete.,» *American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.*, 2001.
- [22] B. G. Skramtajew, «Determining concrete strength for control of concrete in structures,» *J. Am. Concr. Inst.*, p. 285, 1938.
- [23] B. Tremper, «The measurement of concrete strength by embedded pull-out bars,» *Proceedings-American society for testing and materials*, vol. 44, p. 880, 1944.
- [24] J. A. Bickley, «The variability of pullout tests and in-place concrete strength,» *Concrete International*, vol. 4, nº 4, pp. 44-50, 1982.
- [25] W. C. Stone, N. J. Carino y C. P. Reeve, «Statistical methods for in-place strength prediction by the pullout test,» *ACI Journal*, vol. 85, nº 5, pp. 745-756, 1986.
- [26] C. G. Petersen, J. H. Bungey y M. J. Nicholson, «LOK-test and CAPO-test development and their applications,» *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 78, nº 4, pp. 1017-1019, 1985.
- [27] L. M. Khoo, «Pullout techniques – an additional tool for in-situ concrete strength determination, in In-Situ/Nondestructive Testing of Concrete,» *ACI SP-82*, p. 143, 1984.
- [28] T. M. Andrzej, N. J. Carino y C. G. Petersen, «CAPO-TEST to Estimate Concrete Strength in Bridges,» *ACI Materials Journal*, vol. 113, nº 6, pp. 827-836, 2016.

- [29] A. S. Nowak y M. M. Szerszen, «Calibration of design code for buildings (ACI 318): Part 1—Statistical models for resistance,» *ACI Structural Journal*, vol. 3, n° 100, pp. 377-382, 2003.
- [30] B. Graybeal y M. Davis, «Cylinder or cube: strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) ultra-high-performance fiber-reinforced concrete,» *ACI Materials Journal*, vol. 105, n° 6, pp. 603-609, 2008.
- [31] P. S. Song, J. C. Wu, S. Hwang y B. C. Sheu, «Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n° 2, pp. 393-399, 2005.
- [32] A. Turkel y M. H. Ozkul, «Size and wall effects on compressive strength of concretes,» *ACI Materials Journal*, vol. 107, n° 2, pp. 372-379, 2010.
- [33] X. Chen, S. Wu y J. Zhou, «Compressive Strength of Concrete Cores with Different Lengths,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, pp. 1-7, 2014.
- [34] L. Rojas-Henao y J. Fernandez-Gomez, «Rebound hammer, pulse velocity, and core tests in self-consolidating concrete,» *ACI Materials Journal*, vol. 109, n° 2, pp. 235-243, 2012.
- [35] M. Arioz, M. Tuncan y K. Ramyar, «A comparative study on the interpretation of concrete core strength,» *Magazine of Concrete Research*, vol. 52, n° 2, pp. 117-122, 2006.
- [36] B. Akcay, «Variation of in-place concrete core strength in structures from Istanbul area: Statistical analysis of concrete core data,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, n° 5, pp. 507-510, 2004.
- [37] R. H. Campbell y R. E. Tobin, «Core and cylinder strengths of natural and lightweight concrete,» *Journal Proceedings*, vol. 64, n° 4, pp. 190-195, 1967.
- [38] N. Petersons, «Should standard cube test specimens be replaced by test specimens taken from structures?,» *Matériaux et Construction*, vol. 1, n° 5, pp. 425-435, 1968.
- [39] V. M. Malhotra, «Contact strength requirements—Cores versus in situ evaluation,» *Journal Proceedings*, vol. 74, n° 4, pp. 163-172, 1967.
- [40] A. Neville, «Core tests: Easy to perform, not easy to interpret,» *Concrete International*, vol. 23, n° 11, pp. 59-68, 2001.
- [41] A. Turkel y M. H. Ozkul, «Size and wall effects on compressive strength of concretes,» *ACI Materials Journal*, vol. 107, n° 4, pp. 372-379, 2010.
- [42] ASTM C42, «Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete,» *American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA*, 2018.

- [43] J. D. McIntosh, «Electrical Curing of Concrete,» *Magazine of Concrete Research*, vol. 1, nº 1, pp. 21-28, 1949.
- [44] A. G. Saul, «Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure,» *Magazine of Concrete Research*, vol. 2, nº 6, pp. 127-140, 1951.
- [45] P. Freiesleben Hansen y E. J. Pedersen, «Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete,» *Journal of the Nordic Concrete Federation*, nº 1, pp. 21-25, 1977.
- [46] M. Soustos, F. Kanavaris y A. Hatzitheodorou, «Critical analysis of strength estimates from maturity functions,» *Case Studies in Construction Materials*, vol. 9, pp. 1-19, 2018.
- [47] Y. A. Abdel-Jawad, «The Maturity Method: Modifications to Improve Estimation of Concrete Strength at Later Ages,» *Construction and Building Materials*, vol. 15, nº 2-3, pp. 81-92, 2001.
- [48] W. C. Liao, B. J. Lee y C. W. Kang, «A Humidity-adjusted Maturity Function for the Early Age Strength Prediction of Concrete,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, nº 6, pp. 515-523, 2008.
- [49] ASTM C1074, «Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2016.
- [50] T. A. Yikici y H. L. (Roger) Chen, «Use of Maturity Method to Estimate Compressive Strength of Mass Concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 95, pp. 802-812, 2015.
- [51] M. Benaicha, Y. Burtschell y A. Hafidi Alaoui, «Prediction of compressive strength at early age of concrete - Application of maturity,» *Journal of Building Engineering*, vol. 6, pp. 119-125, 2016.
- [52] J. Vilar Fernández, C. Vázquez-Herrero, C. J. Mendoza, R. Meli Piralla y C. Aire Untiveros, «Statistical validation of new maturity functions for high-strength self-consolidating concrete mixes,» *Construction and Building Materials*, vol. 168, p. 931-945, 2018.
- [53] N. Rudeli, A. Santilli y A. Arrambide, «Striking of vertical concrete elements: An analysis using the maturity method,» *Engineering Structures*, vol. 95, pp. 40-48, 2015.
- [54] Z. Mi, Y. Hu, Q. Li, X. Gao y T. Yin, «Maturity model for fracture properties of concrete considering coupling effect of curing temperature and humidity,» *Construction and Building Materials*, vol. 196, pp. 1-13, 2019.
- [55] ASTM C805-13, «Método de prueba estándar para el número de rebote de concreto endurecido,» 2013.

- [56] J. Helal, M. Sofi y P. Mendis, «Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods,» *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 14, nº 1, pp. 97-105, 2015.
- [57] T. L. Parsona y T. R. Naik, «Early Age Concrete Strength Determination Pullout Testing and Maturity,» *In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, American Concrete Institute, pp. 177-199, 1984.
- [58] NRMCA Pub. No. 133-11, «In-Place Concrete Strength Evaluation - A Recommended,» *National Ready Mixed Concrete Association*, 2011.
- [59] E. Vidaud y O. Aguirre, «Pull-Out: Método de estimación de la resistencia a compresión en estructuras de concreto,» *Construction and technology in concrete*, pp. 34-38, 2015.
- [60] Z. Li, J. Desai y W. Bullock, «In-Place Estimation of Concrete Compressive Strength Using Postinstalled Pullout Test – A Case Study,» *Journal of Testing and Evaluation*, pp. 1-16, 2018.
- [61] N. JiJin, I. Seung, Y. SangChoi y J. Yeon, «Prediction of early-age compressive strength of epoxy resin concrete using the maturity method,» *Construction and Building Materials*, vol. 152, nº 15, pp. 990-998, 2017.
- [62] A. G. Saul, «Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure,» *Magazine of Concrete Research*, pp. 127-140, 1951.
- [63] Q. Li, J. Guan, Z. Wu y S. Zhou, «Equivalent maturity for ambient temperature effect on fracture parameters of site-casting dam concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 120, nº 1, pp. 293-308, 2016.
- [64] Z. Mi, y. Hu, Y. Li y H. Zhu, «Elevated temperature inversion phenomenon in fracture properties of concrete and its application to maturity model,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 199, pp. 294-307, 2018.
- [65] M. Soutsos y F. Kanavarisb, «The modified nurse-saul (MNS) maturity function for improved strength estimates at elevated curing temperatures,» *Case Studies in Construction Materials*, vol. 9, 2018.
- [66] M. N. Soutsos, G. Turu'allo, K. Owens, J. Kwasny, S. J. Barnett y P. A. M. Basheer , «Maturity testing of lightweight self-compacting and vibrated concretes,» *Construction and Building Materials*, vol. 47, p. 118–125, 2013.
- [67] N. J. Carino y H. S. Lew, «The Maturity Method: From Theory to Application,» *Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology*, pp. 1-19, 2001.

- [68] J. M. Plowman , «Maturity and the Strength of Concrete,» *Magazine of Concrete*, vol. 8, nº 22, pp. 13-22, 1956.
- [69] N. J. Carino y R. C. Tank, «Maturity Functions for Concrete Made with Various,» *ACI Material Journal*, vol. 89, nº 2, pp. 188-196, 1992.
- [70] J. Byfors, «Plain Concrete at Early Ages,» *Swedish Cement and Concrete Research Institute*, vol. 3, nº 80, p. 464, 1980.
- [71] N. J. Carino y H. S. Lew, «Temperature Effects on Strength-Maturity Relations of Mortar,» *ACI Journal*, vol. 80, nº 3, pp. 77-182, 1983.
- [72] J. Vilar, H. C. Vazquez, C. J. Mendoza, R. Meli y C. Aire, «Statistical validation of new maturity functions for high-strength self consolidating concrete mixes,» *Construction and Building Materials*, vol. 168, pp. 931-945, 2018.
- [73] ASTM C31, «Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2018.
- [74] ASTM C192, «Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2016.
- [75] ASTM C39, «Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2018.
- [76] ASTM C128, «Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2015.
- [77] ASTM C127, «Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2015.
- [78] ASTM C29, «Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2017.
- [79] ASTM C136 , «Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2014.
- [80] ASTM C188, «Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2017.
- [81] ASTM C494, «Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2017.
- [82] ASTM C143, «Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete,» *STM International, West Conshohocken, PA*, 2015.

- [83] ASTM C138, «Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2017.
- [84] ASTM C231, «Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2017.
- [85] ASTM C617, «Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2015.
- [86] ASTM C403, «Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2016.
- [87] ASTM C109, «Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens),» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2016.
- [88] ASTM C150, «Standard Specification for Portland Cement,» *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2018.
- [89] C. C. Correa y L. V. Pacheco, «Comparación de Intervalos de Confianza para el Coeficiente de Correlación,» *VII Coloquio Regional de Estadística*, pp. 1-15, 2010.
- [90] A. Saul, «Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure,» *Magazine of Concrete Research*, pp. 127-140, 1951.
- [91] N. J. Carino y R. C. Tank, «Maturity Functions for Concrete Made with Various,» *ACI Material Journal*, vol. 89, nº 2, pp. 188-196, 1992.

ANEXOS

ANEXO 1



MasterGlenium® 3400

Aditivo reductor de agua de alto rango para concreto

DESCRIPCIÓN

MasterGlenium® 3400 es un aditivo reductor de agua de alto rango listo para su uso que pertenece a una nueva generación de aditivos patentados basados en la tecnología de policarboxilatos. MasterGlenium® 3400 es particularmente efectivo para la producción de mezclas de concreto con mayor tiempo de trabajabilidad para operaciones de acabado y colocación, sin comprometer los requerimientos de alta resistencia inicial.

MasterGlenium® 3400 cumple con los requisitos de la norma ASTM C494/C 494M para aditivos reductores Tipo A y aditivos reductores de agua de alto rango Tipo F y con la Norma ASTM C 1017 para aditivos Tipo I.

USOS RECOMENDADOS

- Concreto donde se desean reducciones de agua del 5 al 40%
- Aplicaciones de concreto que requieran desarrollo de resistencias iniciales muy altas
- Concreto que requiere una fluidez elevada, mayor estabilidad y durabilidad
- Concreto Autoconsolidable (SCC)
- Concreto que requiera resistencia a la medida, tal como el Concreto 4x4™

CARACTERÍSTICAS

- Menor contenido de agua para un nivel dado de trabajabilidad
- Reología controlada
- Mejor retención de revenimiento y trabajabilidad
- Formulación para mejoramiento de la resistencia

BENEFICIOS

- Desarrollo de resistencia inicial extremadamente alta
- Mejora acabado y apariencia de la superficie

- Puede reducir/eliminar la necesidad de vibración y curado a vapor
- Beneficios económicos en los costos de producción total
- Aumenta la productividad

DESEMPEÑO

Resistencia a compresión: El concreto producido con MasterGlenium® 3400 logra una resistencia a la compresión considerablemente más alta en comparación con las mezclas de concreto simples y que contengan naftaleno, melamina y aditivos reductores de agua de alto rango de la primera generación de policarboxilatos.

Datos de la mezcla: Evaluación de laboratorio: materiales cementicios: 415 kg/m³ (3700 lb/yard³), agua/materiales cementicios: 0.40, temperatura ambiente: 21°C (70°F)

Retención a Compresión MPa

Mezcla	12 horas	24 horas
Policarboxilato Convencional	27.1 (3,930)	39.2 (5,690)
MasterGlenium® 3400	29.4 (4,260)	44.7 (6,480)

Datos de la mezcla: Evaluación de campo: materiales cementicios: 415 kg/m³ (700 lb/yard³), agua/materiales cementicios: 0.37, tiempo de curado: 20:14 horas.

Retención a Compresión MPa

Mezcla	12 horas	24 horas
Policarboxilato Convencional	32.1 (4,660)	38.6 (5,600)
MasterGlenium® 3400	38.3 (5,550)	46.0 (6,670)

Retención de revenimiento: MasterGlenium® 3400 fue desarrollado para darle al concreto una resistencia inicial extremadamente alta que permita una buena retención de revenimiento y trabajabilidad de la mezcla en comparación

ANEXO 2

PROCEDIMIENTOS PARA ENCONTRAR LA E_a Y EL T_0

MEZCLA M1

Mezcla	Temperatura (°C)	Tiempos de fraguado				k_i (1/fraguado inicial)	k_f (1/fraguado final)
		inicial (min)	Final (min)	Inicial (hrs)	Final (hrs)		
M1	10.6	318	622	5.3	10.37	0.18867925	0.09643202
	23.4	258	454	4.3	7.56	0.23255814	0.13227513
	39.7	205	329	3.42	5.48	0.29239766	0.18248175

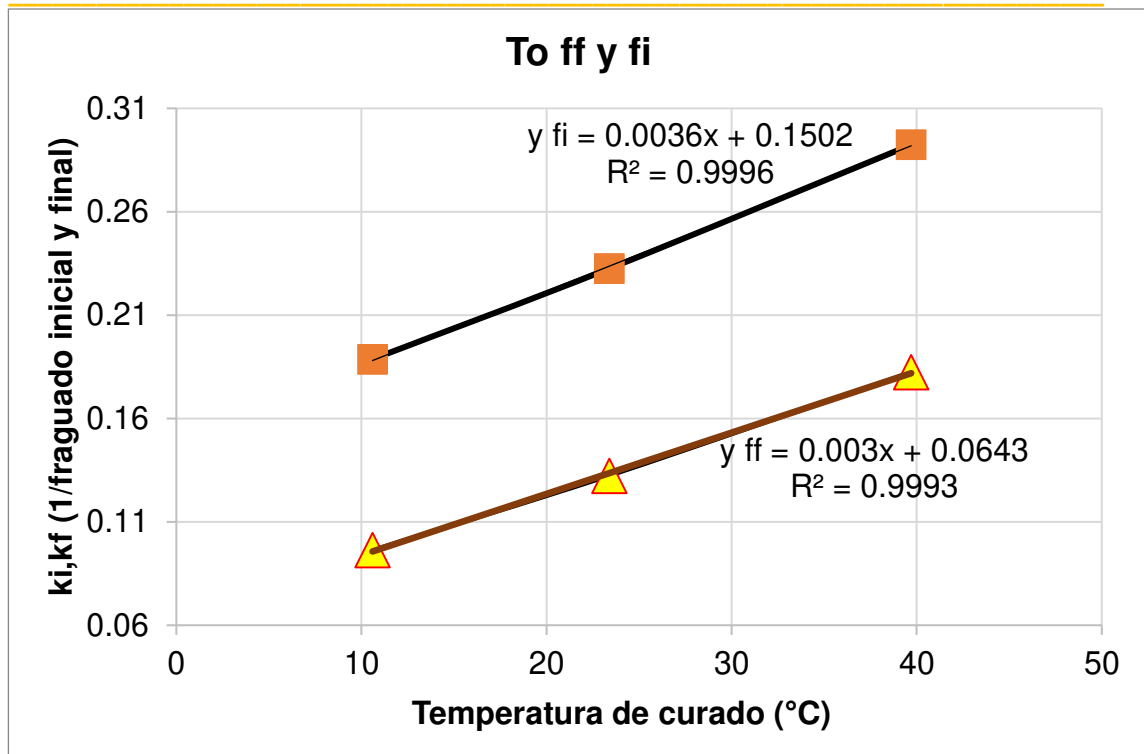
Anexo 2. 1. Datos necesarios para determinar T_0

Dato de temperatura (T_0) Método fi Y ff

El valor de T_0 corresponde a la intersección de la gráfica con el eje de las x para el método del fi y ff. La intersección nos arroja como resultado un valor de temperatura de:

$$T_0(fi) = -41.72 \text{ °C}$$

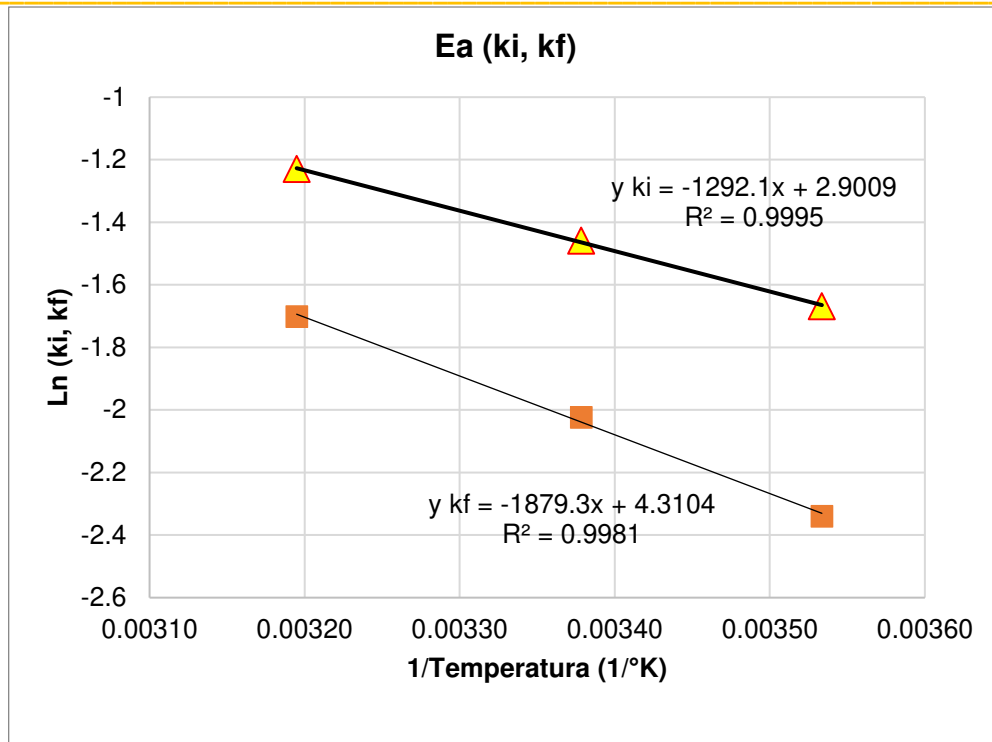
$$T_0(ff) = -21.43 \text{ °C}$$



Anexo 2. 2. Temperatura contra los valores de k_i y k_f (Tasa de variación)

Energía de activación (E_a) método f_i y f_f

Temp (K)	Ln(k_i)	Ln(k_f)	1/Temperatura de curado
283	-1.66770682	-2.33891702	0.00353
296	-1.45861502	-2.02287119	0.00338
313	-1.22964055	-1.7011051	0.00319



Anexo 2. 3. Inverso de la temperatura absoluta en grados Kelvin contra el logaritmo natural de ki, kf (Tasa de variación).

El valor de la pendiente de cada ecuación corresponde a valores de Q que viene siendo la energía de activación dividida entre la constante universal de los gases ideales $R=8.314 \text{ J/mol}^{\circ}\text{K}$. por lo tanto:

$$Q (ki) = 1292 ^{\circ}\text{K}$$

$$Q (kf)= 1879 ^{\circ}\text{K}$$

$$Ea = 10742 \text{ J/mol}$$

$$Ea= 15622 \text{ J/mol}$$

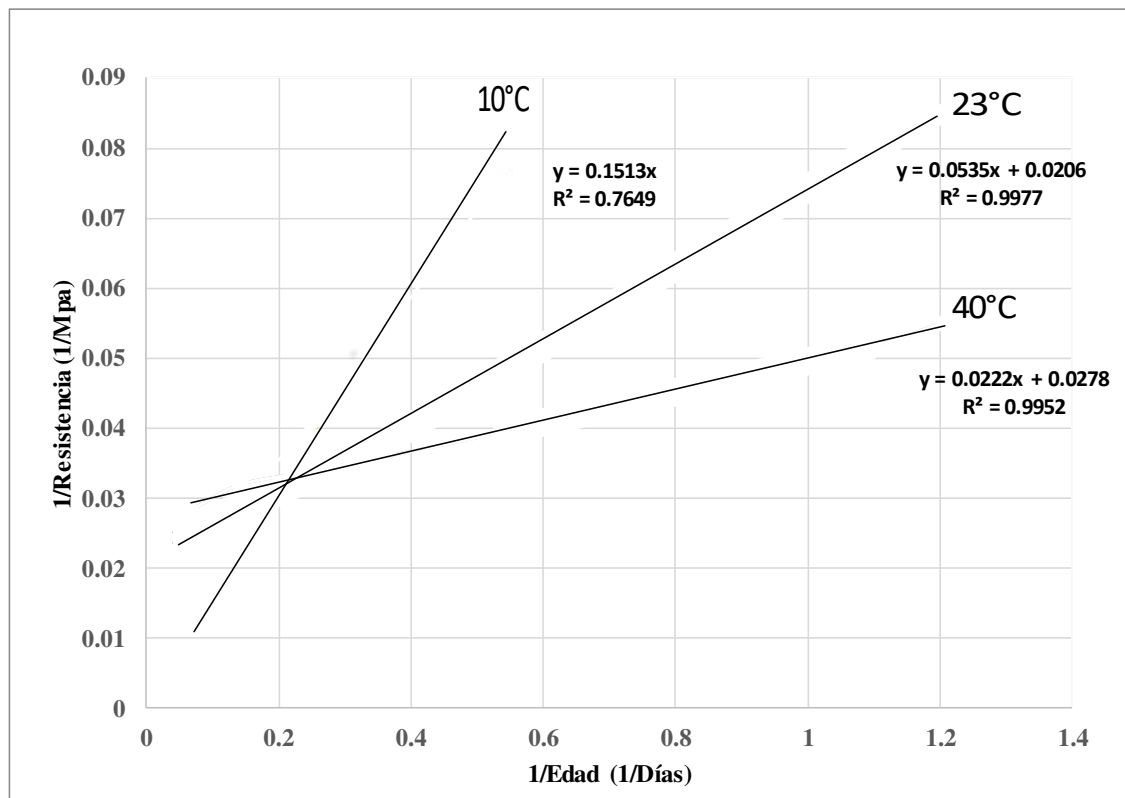
A continuación, se muestra el procedimiento No.3 descrito por la norma ASTM C1074.

MÉTODO 3 DE LA ASTM C 1074 para M1

10°C		23°C		40°C	
1/Resistencia (1/Mpa)	1/edad (1/Días)	1/Resistencia (1/Mpa)	1/edad (1/Días)	1/Resistencia (1/Mpa)	1/edad (1/Días)
0.076463317	0.54360136	0.08534122	1.19700748	0.05516785	1.20706131
0.04048206	0.24973985	0.06685788	0.86906141	0.05153001	1.09190173
0.031105328	0.14301378	0.03785699	0.35955056	0.03956254	0.54471176
0.026220086	0.07228916	0.03081582	0.19793814	0.03399965	0.25889968
0.023038183	0.03710193	0.02898789	0.1433983	0.03197803	0.14368418
		0.02457153	0.04966374	0.02829361	0.06779661

Anexo 2. 4. Tabla de inverso de la resistencia e inverso de la edad

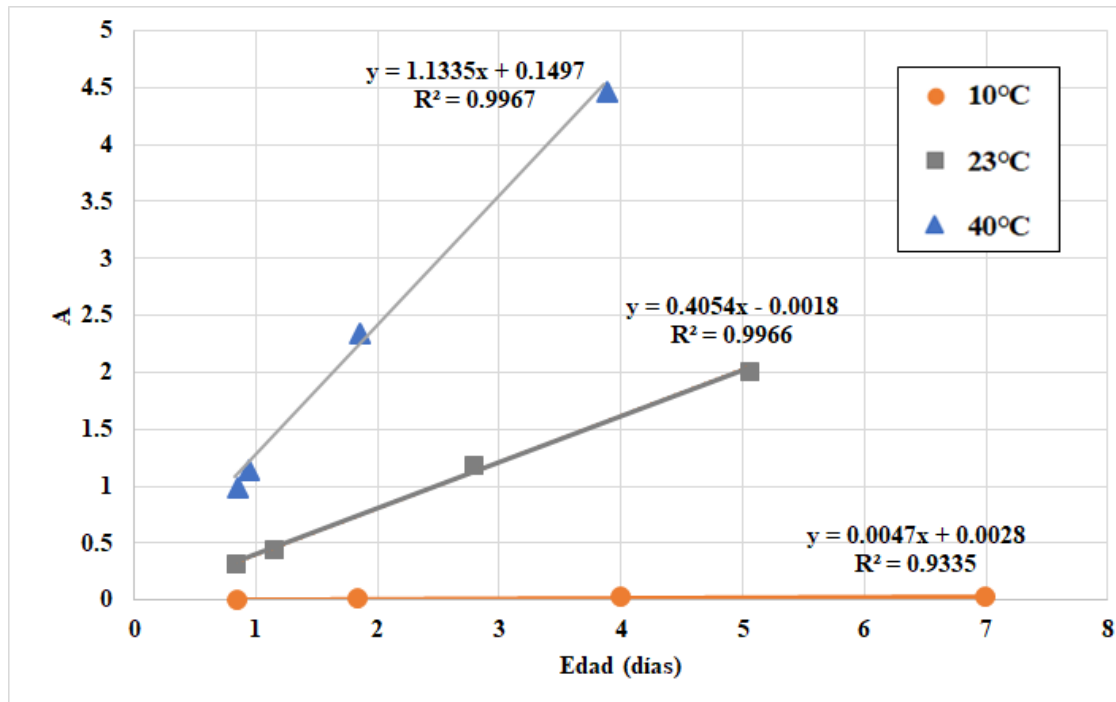
Se trazan las pendientes de mejor ajuste de los últimos 4 datos de resistencia obtenidos a partir de los cubos de mortero equivalente.



Anexo 2. 5. Inverso de la resistencia vs inverso de la edad a las ultimas 4 edades

		b		K		$A = \frac{S}{S_u - S}$				
Temp (k)	Temperatura	Pendiente	Intercepto con el eje vertical	intercepto/ pendiente	Ln(k)	1/Temp	$S_u = \frac{1}{b}$	10°C	23°C	40°C
283	10°C	0.1513	0.001	0.0066093	-5.01926	0.00353	1000	0.003345	0.318189	1.015790
296	23°C	0.0535	0.0206	0.3850467	-0.95439	0.00338	48.5436	0.013251	0.445329	1.171512
313	40°C	0.0222	0.0278	1.2522522	0.22494	0.00319	35.9712	0.025327	1.193719	2.363434
								0.033216	2.016480	4.484123
								0.039650	2.455922	6.653848
								0.045375	5.186912	56.31951

Anexo 2. 6. Valores de b, K, Su y A

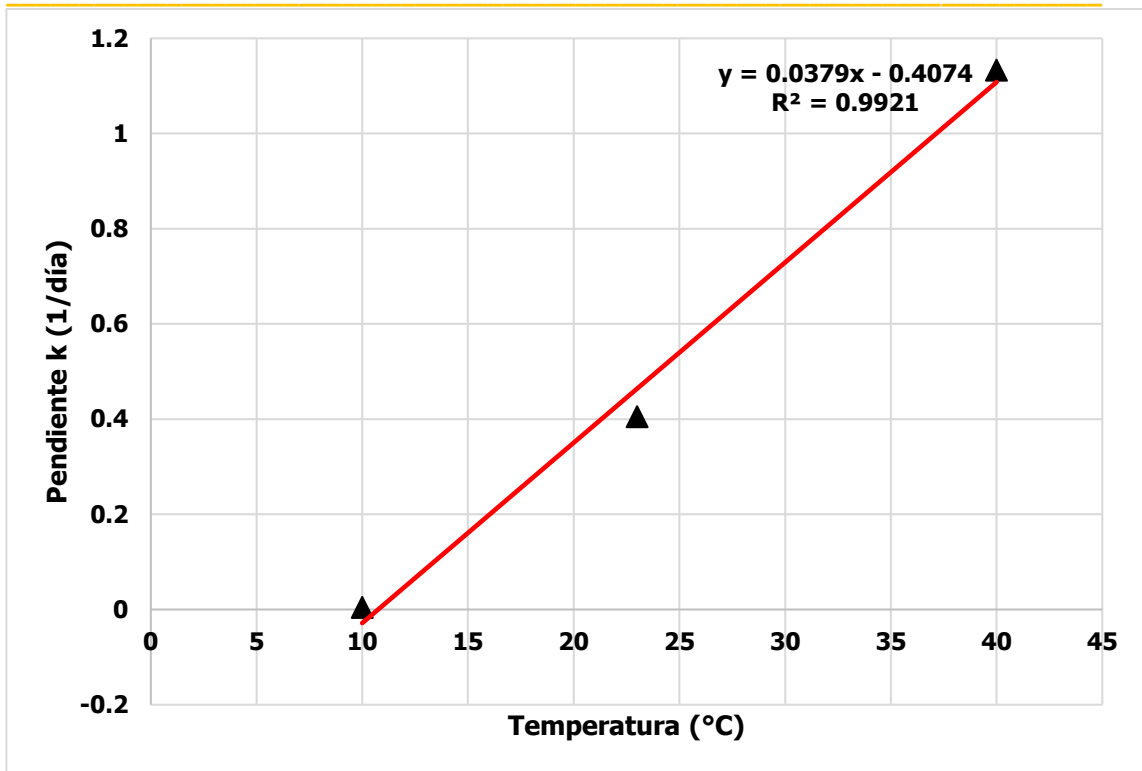


Anexo 2. 7. A vs la edad real de las primeras 4 edades de ensayo.

Se tomó el valor de las 3 pendientes y se graficaron con su respectiva temperatura

Temperatura (°C)	pendiente k (1/día)
10	0.0047
23	0.4054
40	1.1335

Graficando estos valores y aplicando el procedimiento del Apéndice A1.2.1 de la ASTM C1074 encontramos el valor de T_0 en el intercepto con la temperatura cuando la pendiente de k es igual a cero.

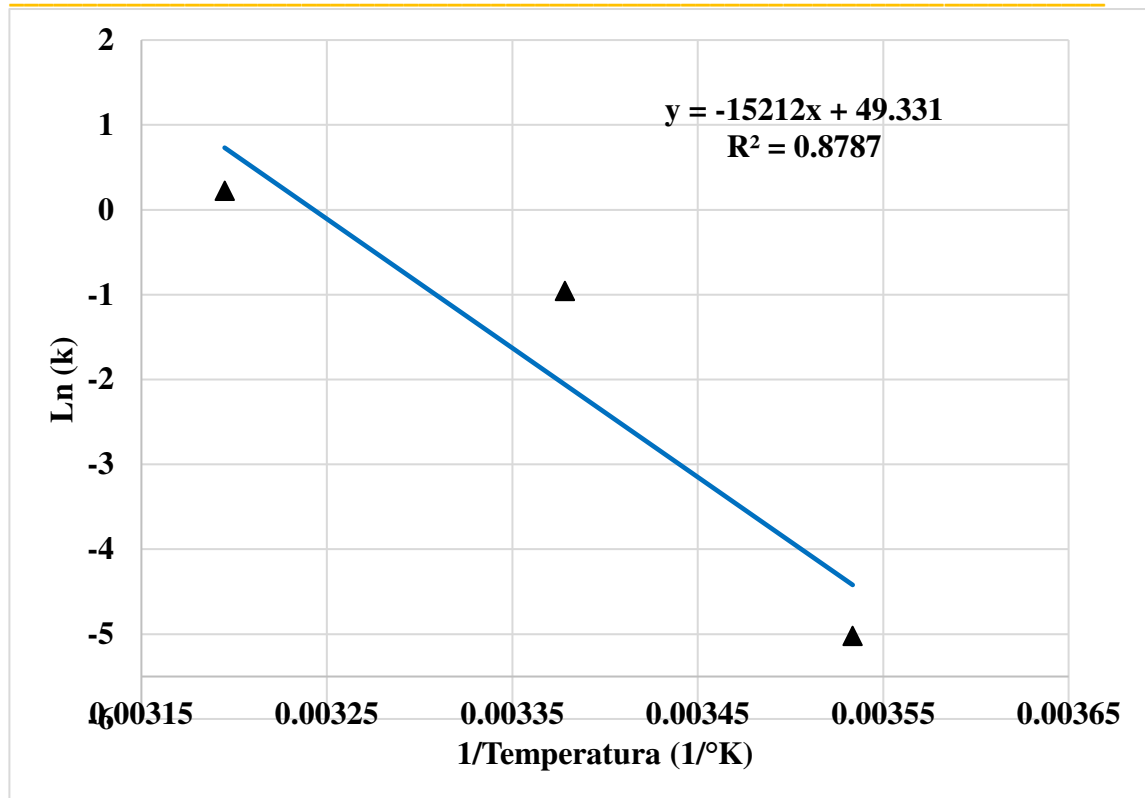


Anexo 2. 8. Pendiente de k vs la temperatura de curado

El valor encontrado para T_0 de acuerdo a la intercepción con el eje de las X es:

$$T_0 (\text{Método 3}) = 10.749 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para encontrar el valor de E_a se grafica el $\ln(K)$ con el inverso de las temperaturas en grados Kelvin.



Anexo 2. 9. Logaritmo natural de K vs el inverso de la temperatura en grados Kelvin

$$Q \text{ (K)} = 15212 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$E_a = 126472.568 \text{ J/mol}$$

El valor de $Q(K)$ es la pendiente de la recta y se multiplica por la constante universal de los gases para poder encontrar la energía de activación.

MEZCLA M2

Mezcla	Temperatura (°C)	Tiempos de fraguado					
		inicial (min)	Final (min)	Inicial (hrs)	Final (hrs)	ki (1/fraguado inicial)	kf (1/fraguado final)
M2	10.2	404	634	6.75	10.56	0.1481481	0.094697
	23.1	268	424	4.46	7.06	0.2242152	0.1416431
	40.5	210	292	3.5	4.86	0.2857143	0.2057613

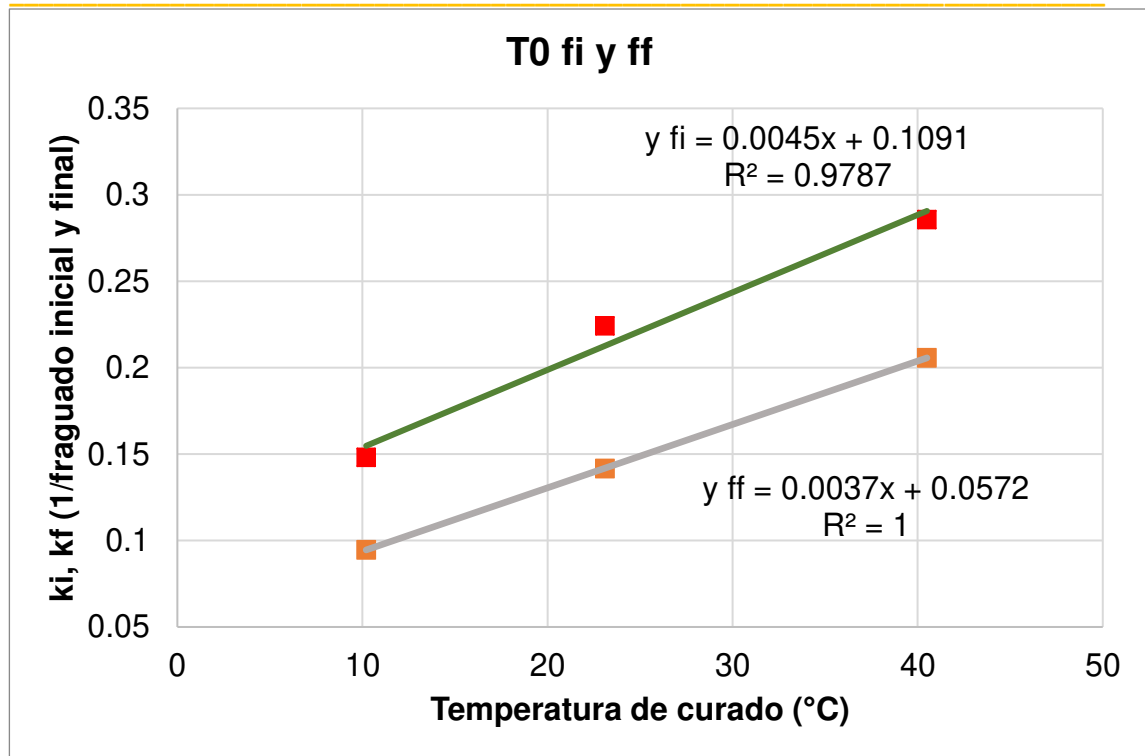
Anexo 2. 10. Datos necesarios para determinar T₀

Dato de temperatura (T₀) Método fi y ff

El valor de T₀ corresponde a la intersección de la gráfica con el eje de las x para el método del fi y ff. La intersección nos arroja como resultado un valor de temperatura de:

$$T_0(fi) = -24.24 \text{ °C}$$

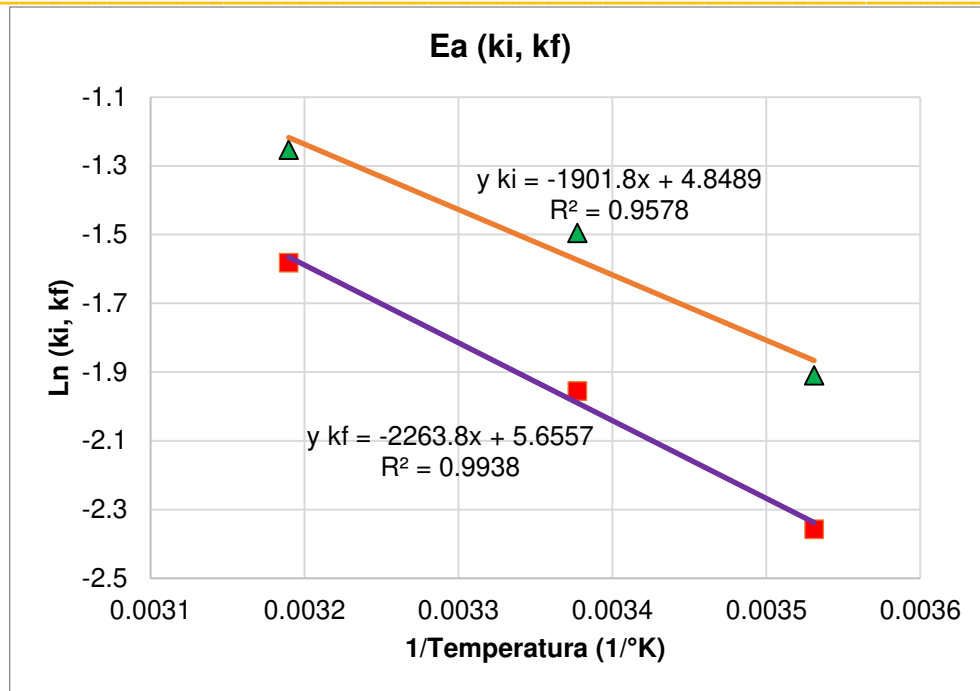
$$T_0(ff) = -15.45 \text{ °C}$$



Anexo 2. 11. Temperatura contra los valores de k_i y k_f (Tasa de variación)

Energía de activación (E_a) método fi y ff

Temp (K)	Ln(k_i)	Ln(k_f)	1/Temperatura de curado
283.2	-1.909543	-2.357073	0.003531073
296.1	-1.495149	-1.954445	0.003377237
313.5	-1.252763	-1.581038	0.003189793



Anexo 2. 12. Inverso de la temperatura absoluta en grados Kelvin contra el logaritmo natural de k_i , k_f (Tasa de variación).

El valor de la pendiente de cada ecuación corresponde a valores de Q que viene siendo la energía de activación dividida entre la constante universal de los gases ideales $R=8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$. por lo tanto:

$$Q(k_i) = 1902^{\circ}\text{K}$$

$$Q(k_f) = 2264^{\circ}\text{K}$$

$$E_a = 15813 \text{ J/mol}$$

$$E_a = 18823 \text{ J/mol}$$

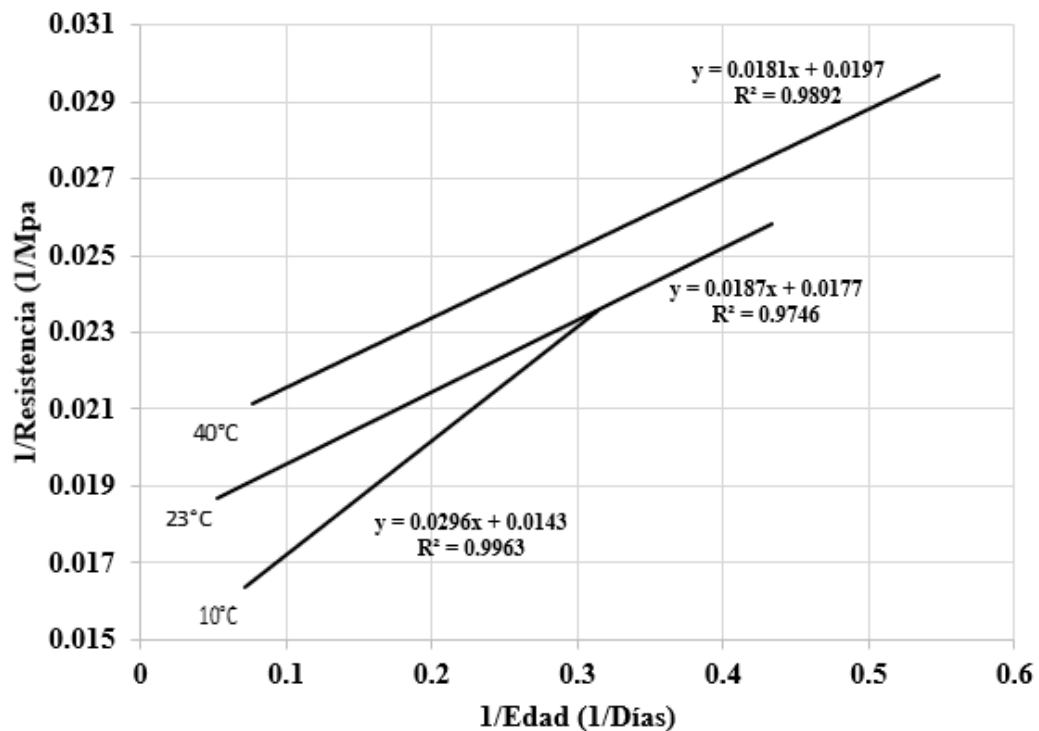
A continuación, se muestra el procedimiento No.3 descrito por la norma ASTM C1074.

MÉTODO 3 DE LA ASTM C 1074 para M1

10°C		23°C		40°C	
1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)	1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)	1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)
0.16604216	1.113689095	0.06177593	1.285760206	0.03943814	2.4
0.04656801	0.548370882	0.04155096	0.886154937	0.03420491	1.109570042
0.0302862	0.313659888	0.02596569	0.433734966	0.02957464	0.548571429
0.0236111	0.143598212	0.02100934	0.205128205	0.02579904	0.315029672
0.01825262	0.071090047	0.02026356	0.101984447	0.02182332	0.143712575
0.01653899	0.035647129	0.0184563	0.052863436	0.02140356	0.077014408

Anexo 2. 13. Tabla de inverso de la resistencia e inverso de la edad

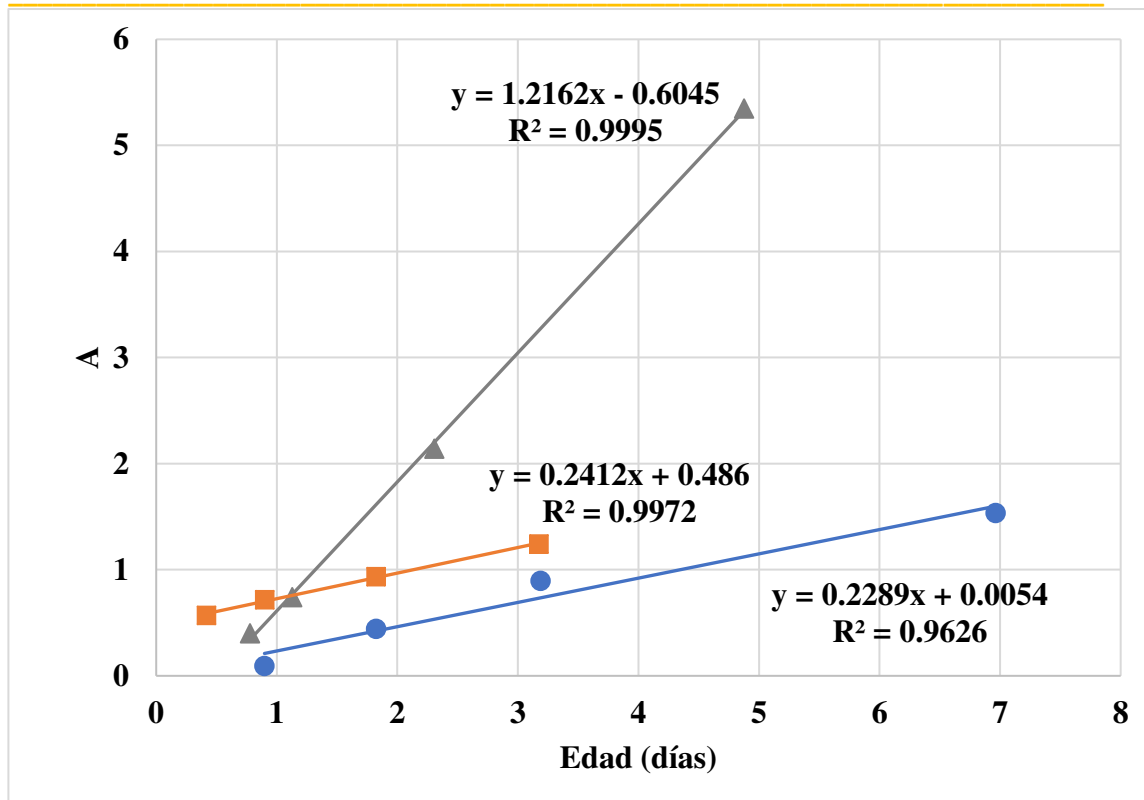
Se trazan las pendientes de mejor ajuste de los últimos 4 datos de resistencia obtenidos a partir de los cubos de mortero equivalente.



Anexo 2. 14. Inverso de la resistencia vs inverso de la edad a las ultimas 4 edades

						$Su = \frac{1}{b}$	$A = \frac{S}{Su - S}$			
Temperatura (°K)	Temperatura (°C)	Pendiente	b Intercepto con el eje vertical	k intercepto/ pendiente	Ln(k)		10°C	23°C	40°C	1/Temp
283	10	0.0296	0.0143	0.48310811	-0.72751482	69.9300699	0.0942388	0.40157969	0.56885677	0.00353357
296	23	0.0187	0.0177	0.94652406	-0.05495888	56.4971751	0.4431633	0.74210853	0.71841562	0.00337838
313	40	0.0181	0.0197	1.08839779	0.0847067	50.7614213	0.89452127	2.1413832	0.93619211	0.00319489
							1.53580187	5.34849048	1.24358215	
							3.61785694	6.90445724	1.90075753	
							6.38680189	23.4033324	2.01307518	

Anexo 2. 15. Anexo 2. 6. Valores de b, K, Su y A.

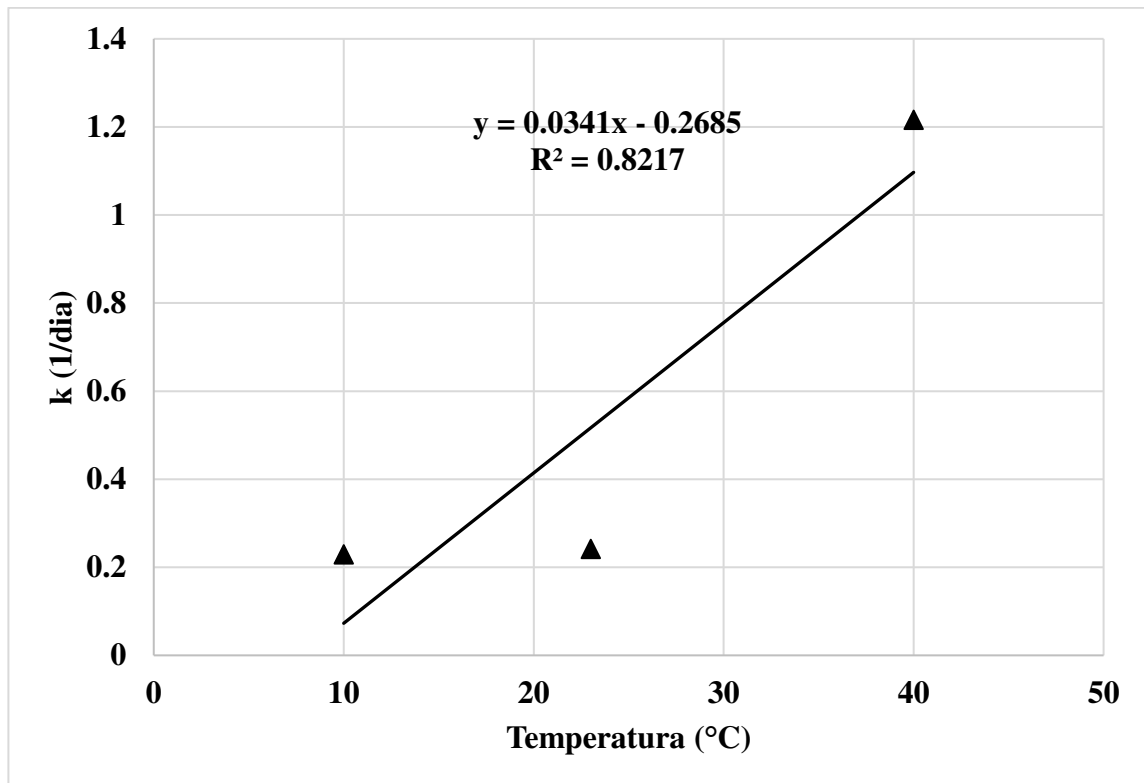


Anexo 2. 16. A vs la edad real de las primeras 4 edades de ensayo.

Se tomó el valor de las 3 pendientes y se graficaron con su respectiva temperatura

Temperatura	Pendiente de A VS edad
10	0.2289
40	1.2162
23	0.2412

Graficando estos valores y aplicando el procedimiento del Apéndice A1.2.1 de la ASTM C1074 encontramos el valor de T_0 en el intercepto con la temperatura. Cuando la pendiente de k es igual a cero.

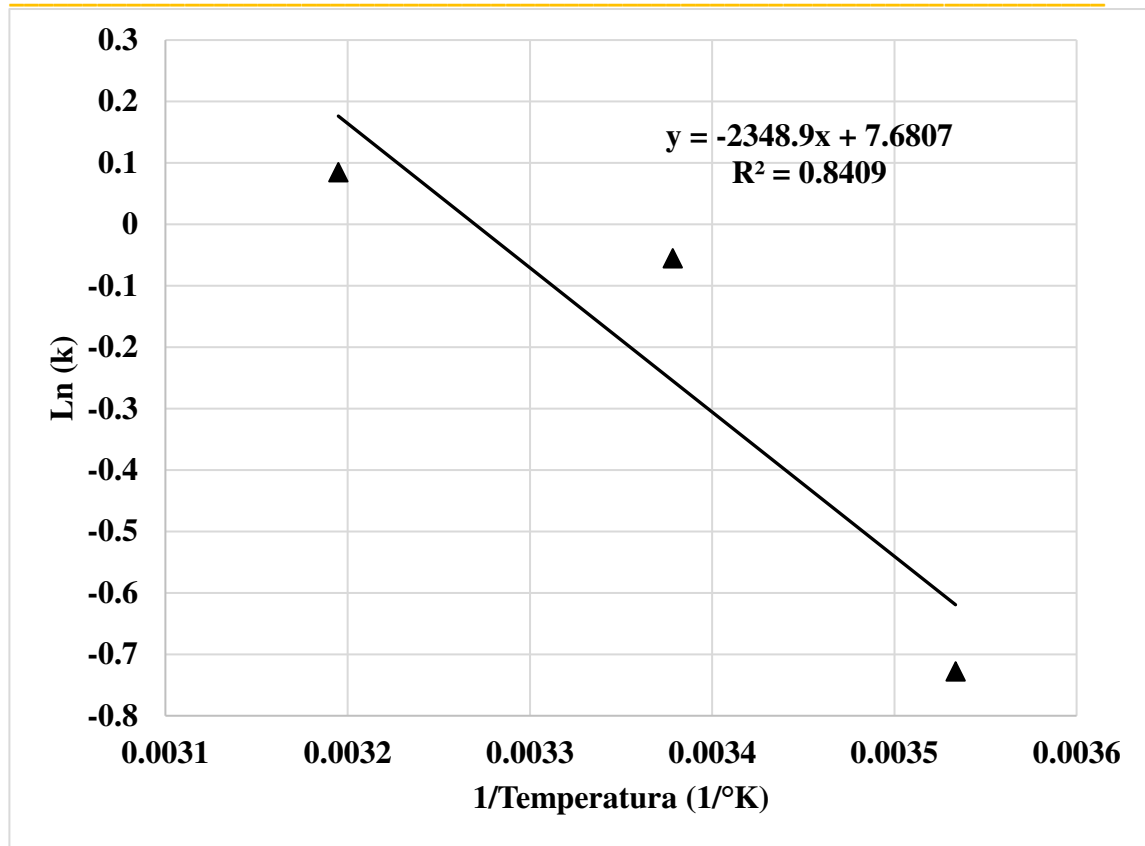


Anexo 2. 17. Pendiente de k vs la temperatura de curado

El valor encontrado para T_0 de acuerdo a la intercepción con el eje de las X es:

$$T_0 \text{ (Método 3)} = 7.87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para encontrar el valor de E_a se grafica el $\ln(K)$ con el inverso de las temperaturas en grados Kelvin.



Anexo 2. 18. Logaritmo natural de K vs el inverso de la temperatura en grados Kelvin

$$Q (K)= 2348.9 \text{ °K}$$

$$E_a= 19528.7546 \text{ J/mol}$$

El valor de $Q(K)$ es la pendiente de la recta y se multiplica por la constante universal de los gases para poder encontrar la energía de activación.

MEZCLA M3

Mezcla	Temperatura (°C)	Tiempos de fraguado				k_i (1/fraguado inicial)	k_f (1/fraguado final)
		Inicial (min)	Final (min)	Inicial (hrs)	Final (hrs)		
M3	10.1	341	537	5.68	9.33	0.1760563	0.1071811
	23.1	252	406	4.2	6.76	0.2380952	0.147929
	40.3	185	267	3.08	4.45	0.3246753	0.2247191

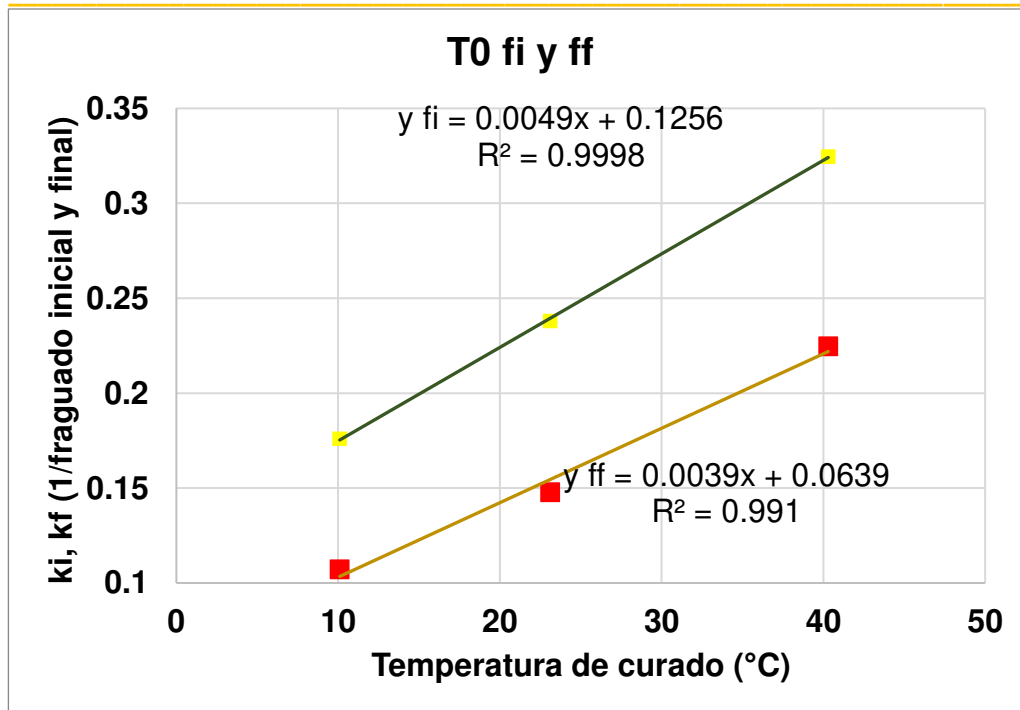
Anexo 2. 19. Datos necesarios para determinar T_0

Dato de temperatura (T_0) Método fi y ff

El valor de T_0 corresponde a la intersección de la gráfica con el eje de las x para el método del fi y ff. La intersección nos arroja como resultado un valor de temperatura de:

$$T_0(fi) = -25.63\text{ °C}$$

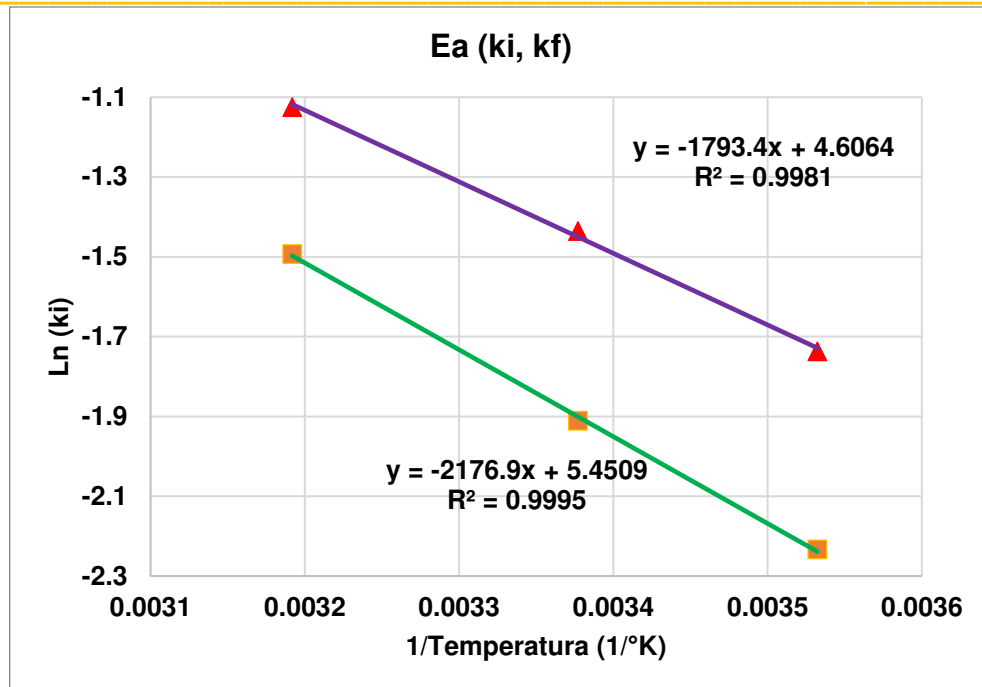
$$T_0(ff) = -16.38\text{ °C}$$



Anexo 2. 20. Temperatura contra los valores de ki y kf (Tasa de variación)

Energía de activación (Ea) método fi y ff

Temp (K)	Ln(ki)	Ln(kf)	1/Temperatura de curado
283.1	-1.73695123	-2.23323501	0.00353232
296.1	-1.43508453	-1.91102289	0.00337724
313.3	-1.1249296	-1.4929041	0.00319183



Anexo 2. 21. Inverso de la temperatura absoluta en grados Kelvin contra el logaritmo natural de k_i , k_f (Tasa de variación).

El valor de la pendiente de cada ecuación corresponde a valores de Q que viene siendo la energía de activación dividida entre la constante universal de los gases ideales $R=8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$. por lo tanto:

$$Q(k_i) = 1793 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$Q(k_f) = 2176 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$E_a = 16403 \text{ J/mol}$$

$$E_a = 18091 \text{ J/mol}$$

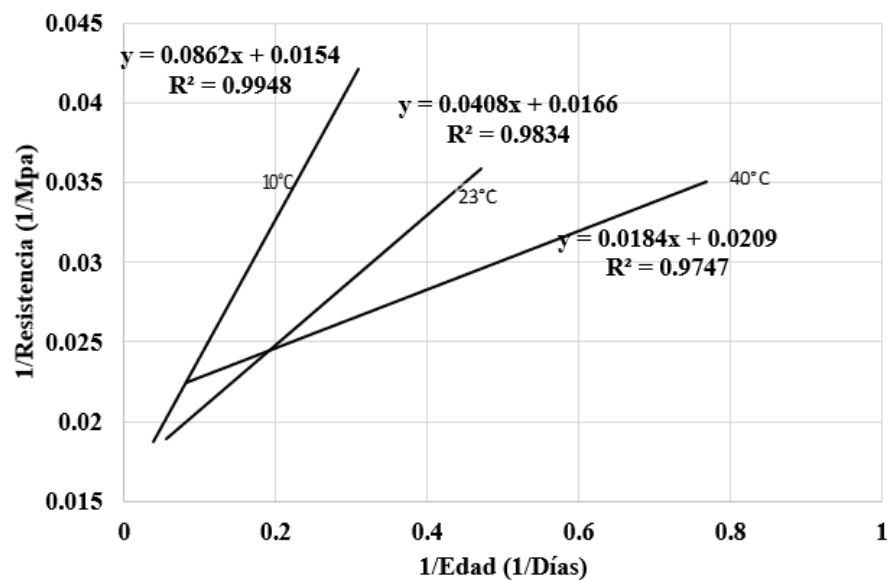
A continuación, se muestra el procedimiento No.3 descrito por la norma ASTM C1074.

MÉTODO 3 DE LA ASTM C 1074 PARA LA M3

10°C		23°C		40°C	
1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)	1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)	1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)
0.39544448	1.15662651	0.08682867	1.14285714	0.09851699	3.2
0.19396134	0.7659656	0.06663069	0.84955752	0.03764456	1.14285714
0.04252364	0.31007752	0.03630265	0.47058824	0.03470154	0.768
0.0281493	0.16064257	0.02341451	0.20122974	0.02802649	0.31088083
0.02260558	0.07717042	0.02129733	0.10979794	0.02358418	0.16853933
0.01886792	0.03927987	0.01964975	0.05549133	0.02196024	0.08269684

Anexo 2. 22. 13. Tabla de inverso de la resistencia e inverso de la edad

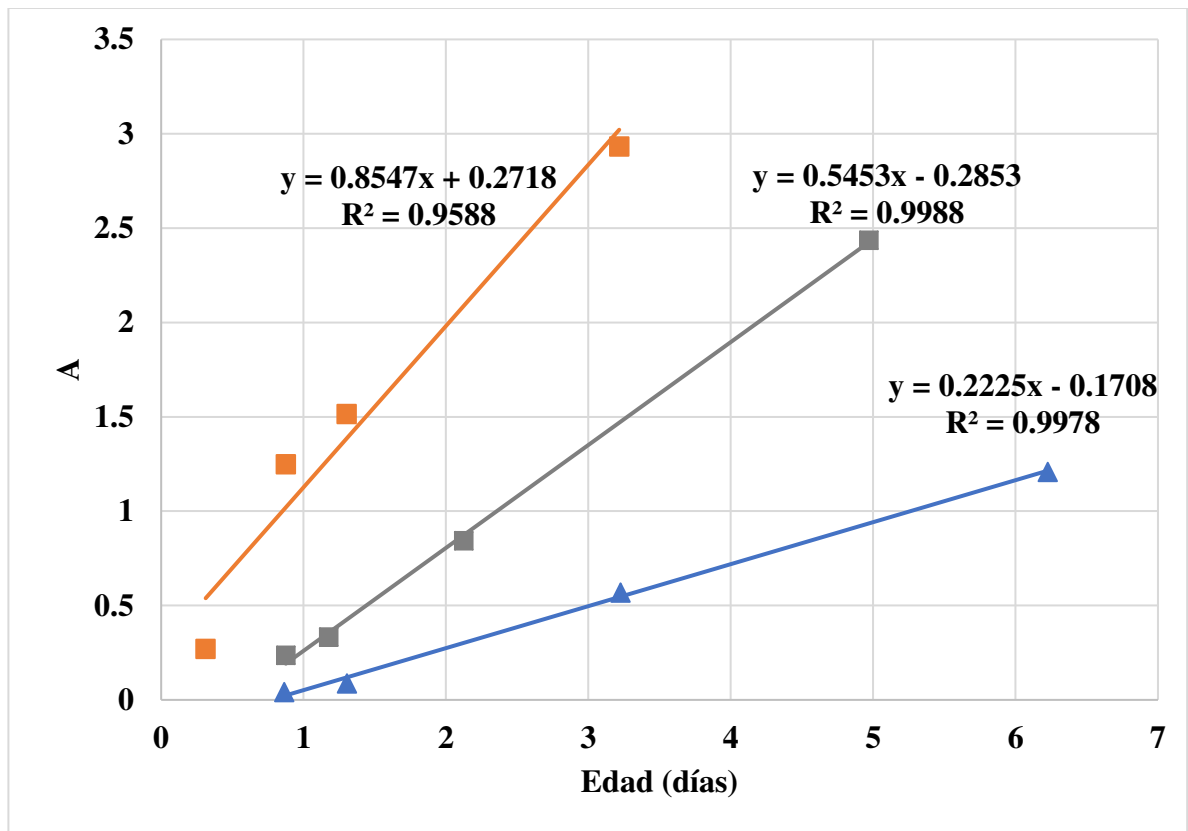
Se trazan las pendientes de mejor ajuste de los últimos 4 datos de resistencia obtenidos a partir de los cubos de mortero equivalente.



Anexo 2. 23. Inverso de la resistencia vs inverso de la edad a las ultimas 4 edades

Temperatura (°K)	Temperatura (°C)	b		k		$Su = \frac{1}{b}$		$A = \frac{S}{Su - S}$			
		Pendiente	Intercepto con el eje vertical	intercepto/pendiente	Ln(k)	Su	10°C	23°C	40°C	1/Temp	
283	10	0.0862	0.0154	0.17865429	-1.72230	64.9350	0.04052	0.236370	0.26927094	0.00353357	
296	23	0.0408	0.0166	0.40686275	-0.89939	60.2409	0.08627	0.331796	1.24816693	0.00337838	
313	40	0.0184	0.0209	1.13586957	0.12739	47.8468	0.56749	0.842526	1.514324	0.00319489	
							1.2079	2.435979	2.93272131		
							2.1372	3.533919	7.78635563		
							4.4406	5.443069	19.7124317		

Anexo 2. 24. Anexo 2. 6. Valores de b, K, Su y A.

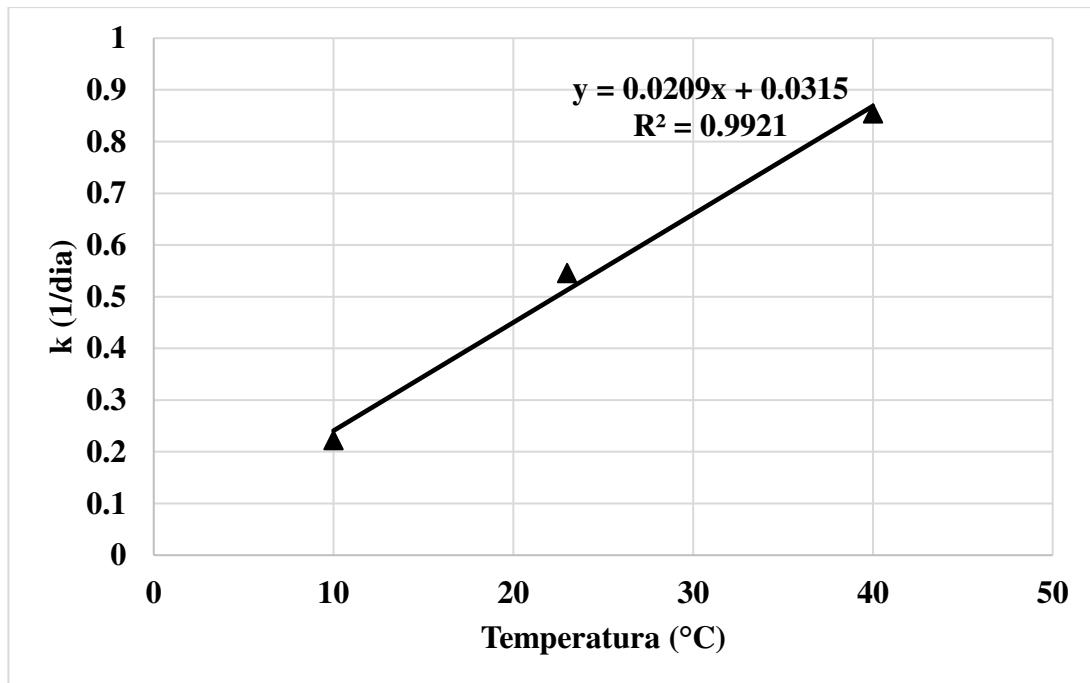


Anexo 2. 25. A vs la edad real de las primeras 4 edades de ensayo

Tomamos el valor de las 3 pendientes y se graficaron con su respectiva temperatura.

Temperatura	Pendiente de A VS edad
10	0.2225
23	0.5453
40	0.8547

Graficando estos valores y aplicando el procedimiento del Apéndice A1.2.1 de la ASTM C1074 encontramos el valor de T_0 en el intercepto con la temperatura. Cuando la pendiente de k es igual a cero.

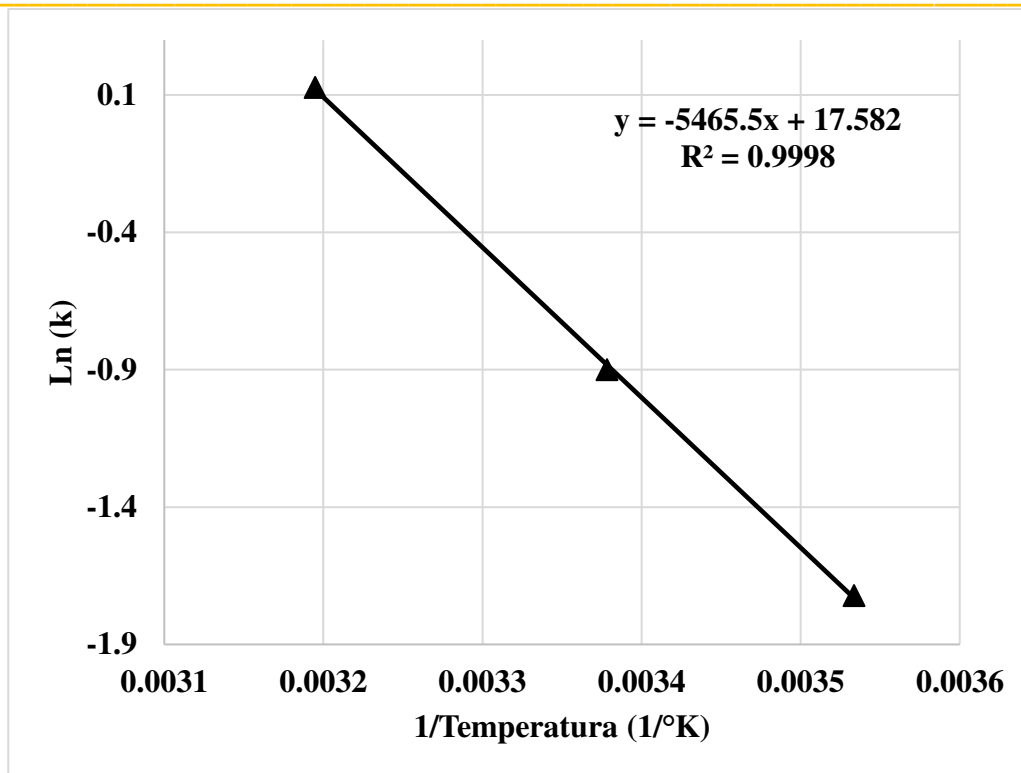


Anexo 2. 26. Pendiente de k vs la temperatura de curado

El valor encontrado para T_0 de acuerdo a la intercepción con el eje de las X es:

$$T_0 (\text{Método 3}) = -1.50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para encontrar el valor de E_a se grafica el $\ln(K)$ con el inverso de las temperaturas en grados Kelvin.



Anexo 2. 27. Logaritmo natural de K vs el inverso de la temperatura en grados Kelvin

$$Q(K) = 5465.5^{\circ}\text{K}$$

$$E_a = 45440.167 \text{ J/mol}$$

El valor de $Q(K)$ es la pendiente de la recta y se multiplica por la constante universal de los gases para poder encontrar la energía de activación.

MEZCLA M4

Mezcla	Temperatura (°C)	Tiempos de fraguado				k_i	k_f
		inicial (min)	Final (min)	Inicial (hrs)	Final (hrs)	(1/fraguado inicial)	(1/fraguado final)
M4	9.8	321	486	5.35	8.1	0.18691589	0.12345679
	23.3	270	416	4.5	6.93	0.22222222	0.14423077
	40	201	294	3.35	4.9	0.29850746	0.20408163

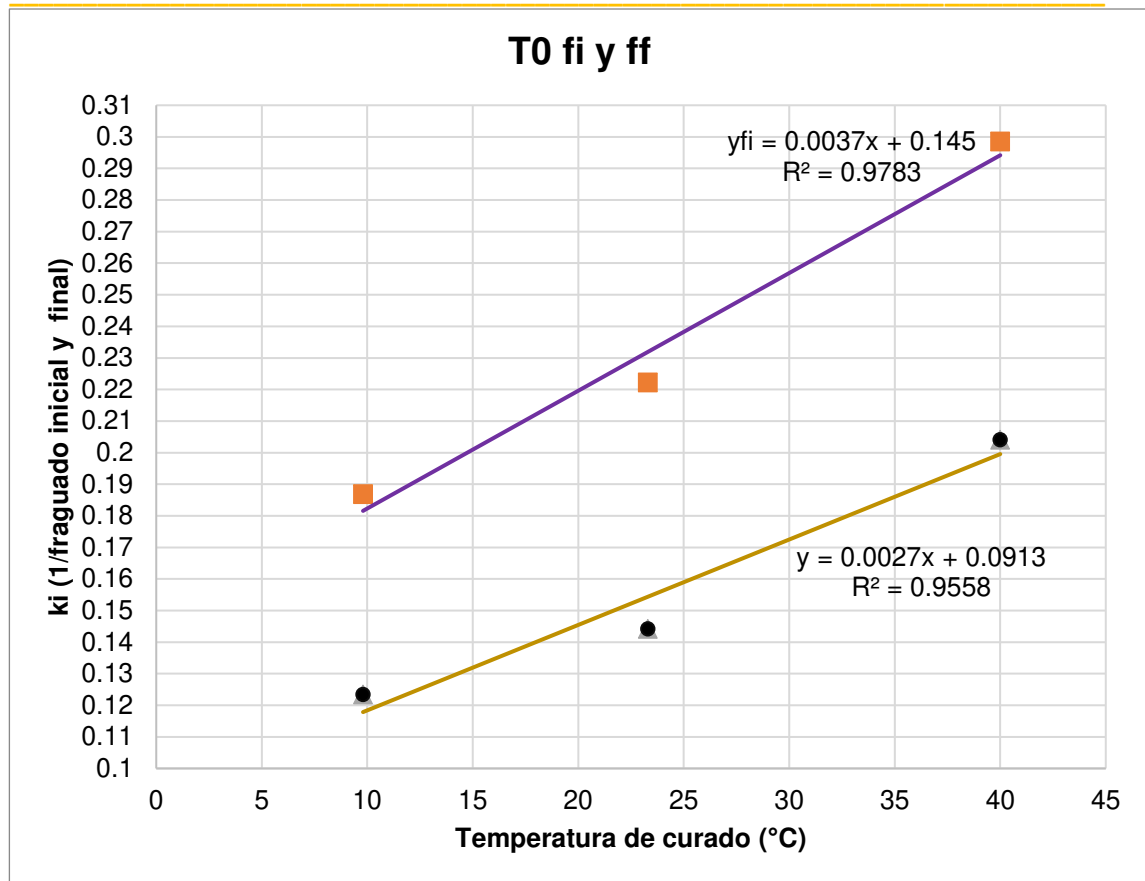
Anexo 2. 28. Datos necesarios para determinar T0

Dato de temperatura (T_0) Método fi y ff

El valor de T_0 corresponde a la intersección de la gráfica con el eje de las x para el método del fi y ff. La intersección nos arroja como resultado un valor de temperatura de:

$$T_0(fi) = -39.19 \text{ °C}$$

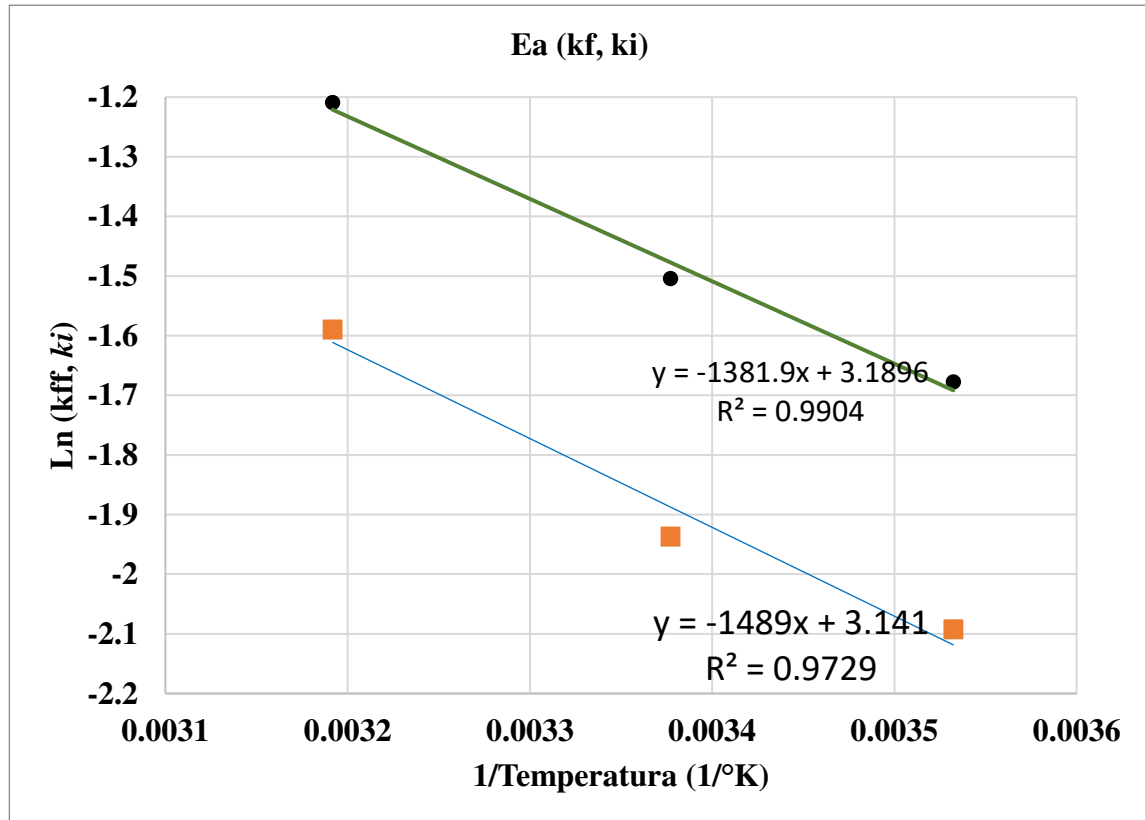
$$T_0(ff) = -33.81 \text{ °C}$$



Anexo 2. 29. Temperatura contra los valores de ki y kf (Tasa de variación)

Energía de activación (Ea) método fi y ff

temp (k)	ln(ki)	ln(kf)	1/temperatura de curado
283.1	-1.67709656	-2.09186406	0.00353232
296.1	-1.5040774	-1.9363407	0.00337724
313.3	-1.20896035	-1.58923521	0.00319183



Anexo 2. 30. Inverso de la temperatura absoluta en grados Kelvin contra el logaritmo natural de k_i , k_f (Tasa de variación).

El valor de la pendiente de cada ecuación corresponde a valores de Q que viene siendo la energía de activación dividida entre la constante universal de los gases ideales $R=8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$. por lo tanto:

$$Q(k_i) = 1382^{\circ}\text{K} \quad Q(k_f) = 1382^{\circ}\text{K}$$

$$E_a = 11489 \text{ J/mol} \quad E_a = 11489.98 \text{ J/mol}$$

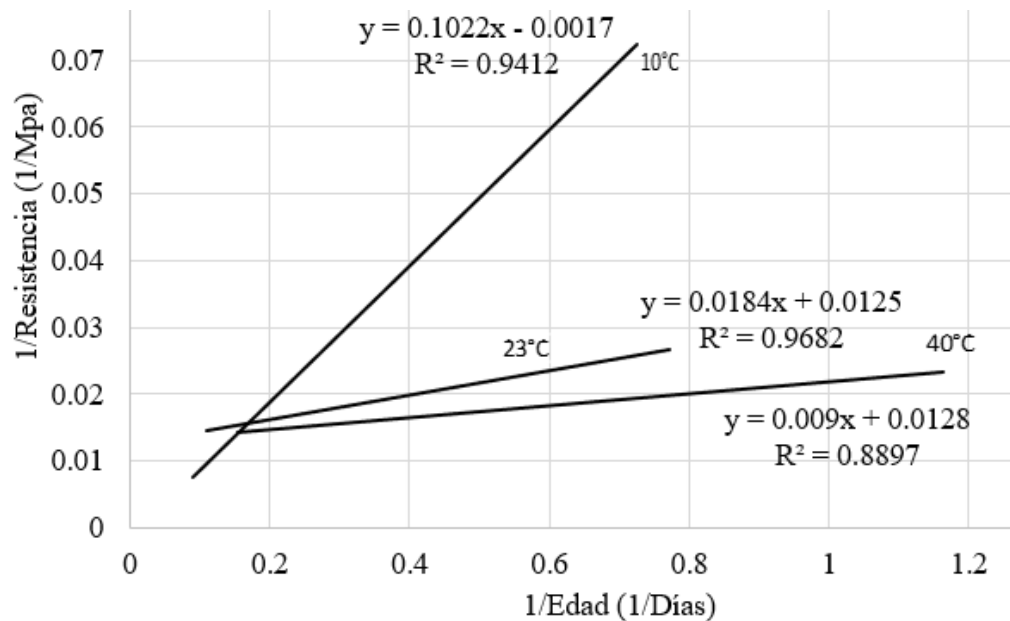
A continuación, se muestra el procedimiento No.3 descrito por la norma ASTM C1074

MÉTODO 3 DE LA ASTM C 1074 PARA LA M3

10°C		23°C		40°C	
1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)	1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)	1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)
0.1705786	1.22762148	0.03993004	1.34378499	0.07166404	3.0125523
0.07625729	0.72471062	0.02738001	0.77120823	0.02438786	1.1622276
0.02322222	0.34107058	0.01931505	0.44728831	0.0171904	0.7135778
0.01687132	0.18480493	0.01689572	0.20607344	0.0156912	0.31365716
0.01382678	0.09114501	0.0147752	0.10982641	0.01502855	0.15291494

Anexo 2. 31. Tabla de inverso de la resistencia e inverso de la edad

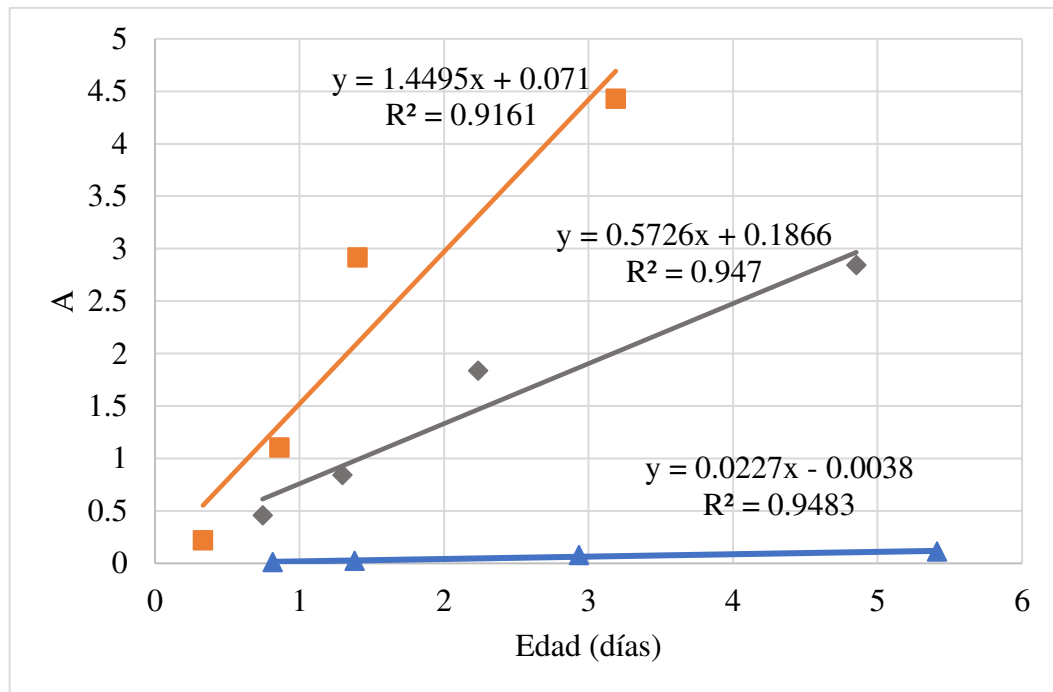
Se trazan las pendientes de mejor ajuste de los últimos 4 datos de resistencia obtenidos a partir de los cubos de mortero equivalente.



Anexo 2. 32. Inverso de la resistencia vs inverso de la edad a las ultimas 4 edades

Temperatura (°K)	Temperatura (°C)	Pendiente	Intercepto con el eje vertical	intercepto/pendiente	Ln(k)	Su	10 °C	23 °C	40 °C	1/Temp
283	10	0.1022	0.0017	0.01663405	-4.09630343	588.235294	0.0100664	0.45570472	0.21745025	0.0035335
296	23	0.0184	0.0125	0.67934783	-0.38662202	80	0.02280126	0.84005336	1.10460386	0.0033788
313	40	0.009	0.0128	1.42222222	0.35222059	78.125	0.07898812	1.83417591	2.91545131	0.0031948
							0.11205356	2.84367763	4.42723168	
							0.14018556	5.49403361	5.74363401	

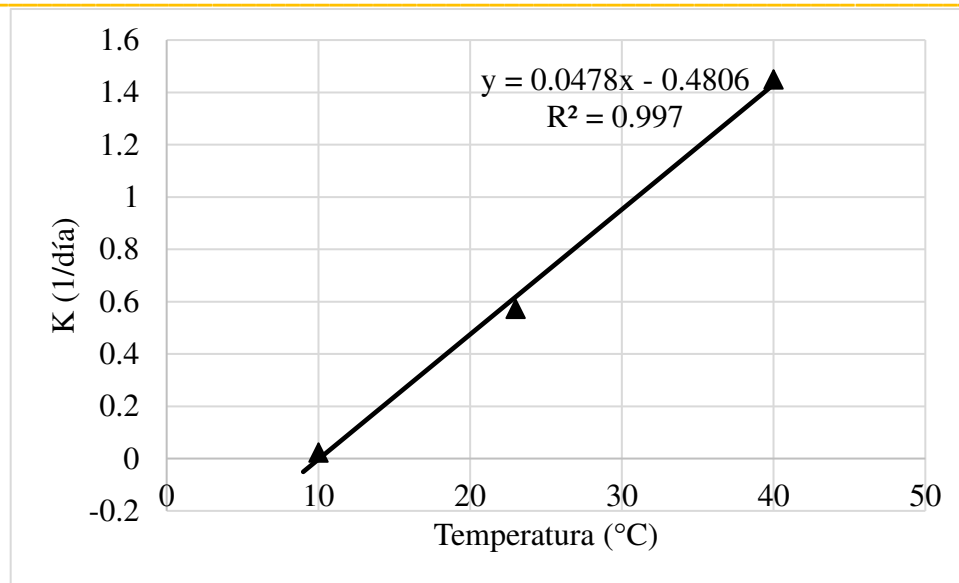
Anexo 2. 33. Anexo 2. 6. Valores de b, K, Su y A.



Anexo 2. 34A vs la edad real de las primeras 4 edades de ensayo

Temperatura	Pendiente de A VS edad
10	0.0227
23	0.5726
40	1.4495

Graficando estos valores y aplicando el procedimiento del Apéndice A1.2.1 de la ASTM C1074 encontramos el valor de T_0 en el intercepto con la temperatura. Cuando la pendiente de k es igual a cero.

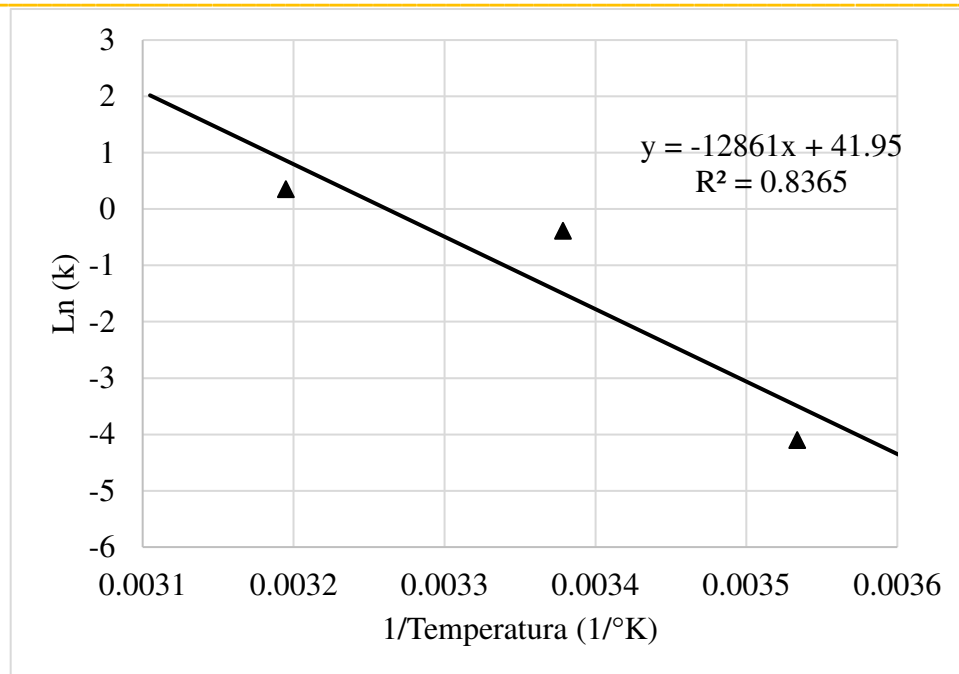


Anexo 2. 35Pendiente de k vs la temperatura de curado

El valor encontrado para T_0 de acuerdo a la intercepción con el eje de las X es:

$$T_0 (\text{Método 3}) = 10.054 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para encontrar el valor de E_a se grafica el $\ln(K)$ con el inverso de las temperaturas en grados Kelvin.



Anexo 2. 36. Logaritmo natural de K vs el inverso de la temperatura en grados Kelvin

$$Q(K) = 12861^{\circ}\text{K}$$

$$E_a = 106926 \text{ J/mol}$$

El valor de $Q(K)$ es la pendiente de la recta y se multiplica por la constante universal de los gases para poder encontrar la energía de activación.

MEZCLA M5

Mezcla	Temperatura (°C)	Tiempos de fraguado				k_i (1/fraguado inicial)	k_f (1/fraguado final)
		inicial (min)	Final (min)	Inicial (hrs)	Final (hrs)		
M5	9.5	317	457	5.28	7.62	0.189393939	0.131233596
	23.4	282	402	4.7	6.7	0.212765957	0.149253731
	41	220	337	3.66	5.6	0.273224044	0.178571429

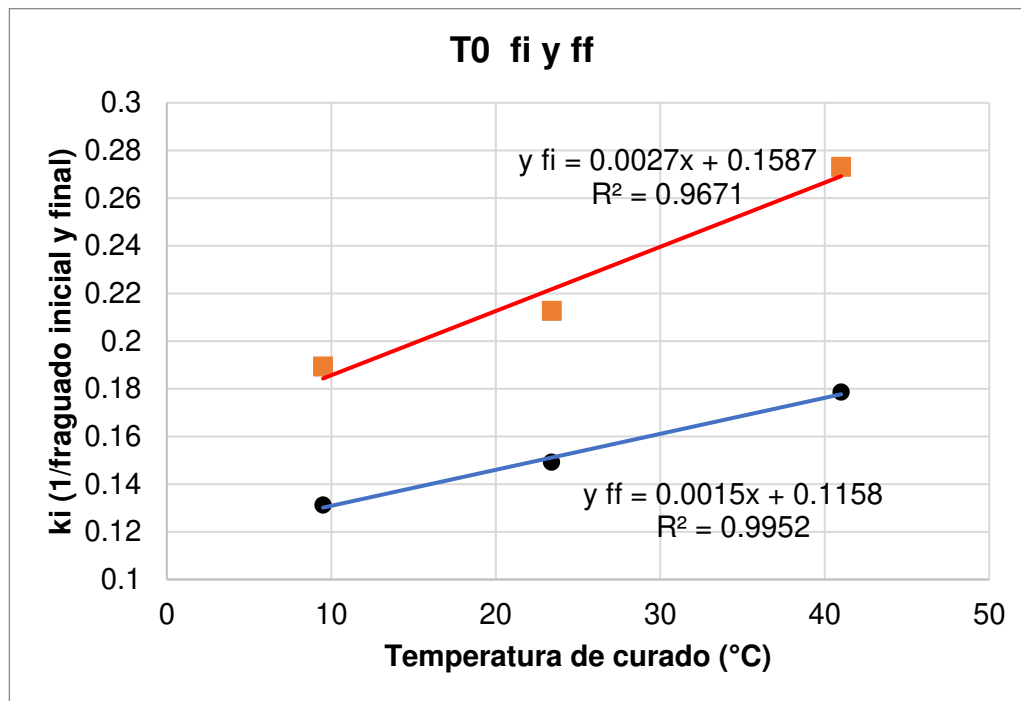
Anexo 2. 37. 2. 1. Datos necesarios para determinar T_0

Dato de temperatura (T_0) Método fi y ff

El valor de T_0 corresponde a la intersección de la gráfica con el eje de las x para el método del fi y ff. La intersección nos arroja como resultado un valor de temperatura de:

$$T_0(fi) = -58.77\text{ °C}$$

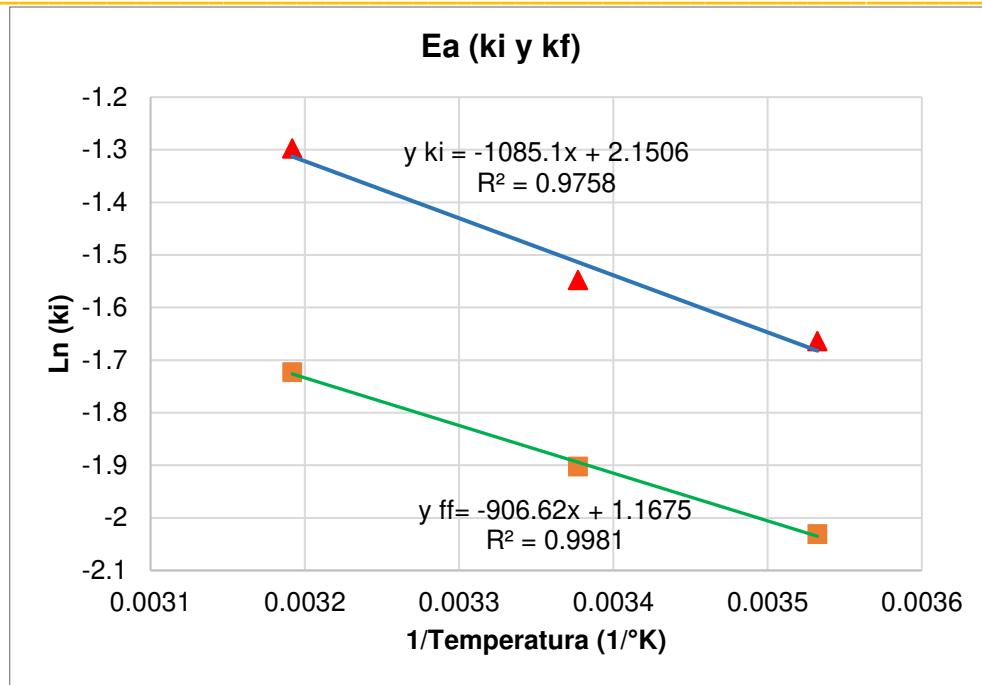
$$T_0(ff) = -77.22\text{ °C}$$



Anexo 2. 38. Temperatura contra los valores de ki y kf (Tasa de variación)

Energía de activación (Ea) método fi y ff

Temp (K)	Ln(ki)	Ln(kf)	1/Temperatura de curado
283.1	-1.6639261	-2.03077637	0.00353232
296.1	-1.54756251	-1.90210753	0.00337724
313.3	-1.29746315	-1.7227666	0.00319183



Anexo 2. 39. Inverso de la temperatura absoluta en grados Kelvin contra el logaritmo natural de ki, kf (Tasa de variación).

El valor de la pendiente de cada ecuación corresponde a valores de Q que viene siendo la energía de activación dividida entre la constante universal de los gases ideales $R=8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$. por lo tanto:

$$Q (ki) = 1085^\circ\text{K}$$

$$Q (kf) = 907^\circ\text{K}$$

$$Ea = 9020 \text{ J/mol}$$

$$Ea = 7541 \text{ J/mol}$$

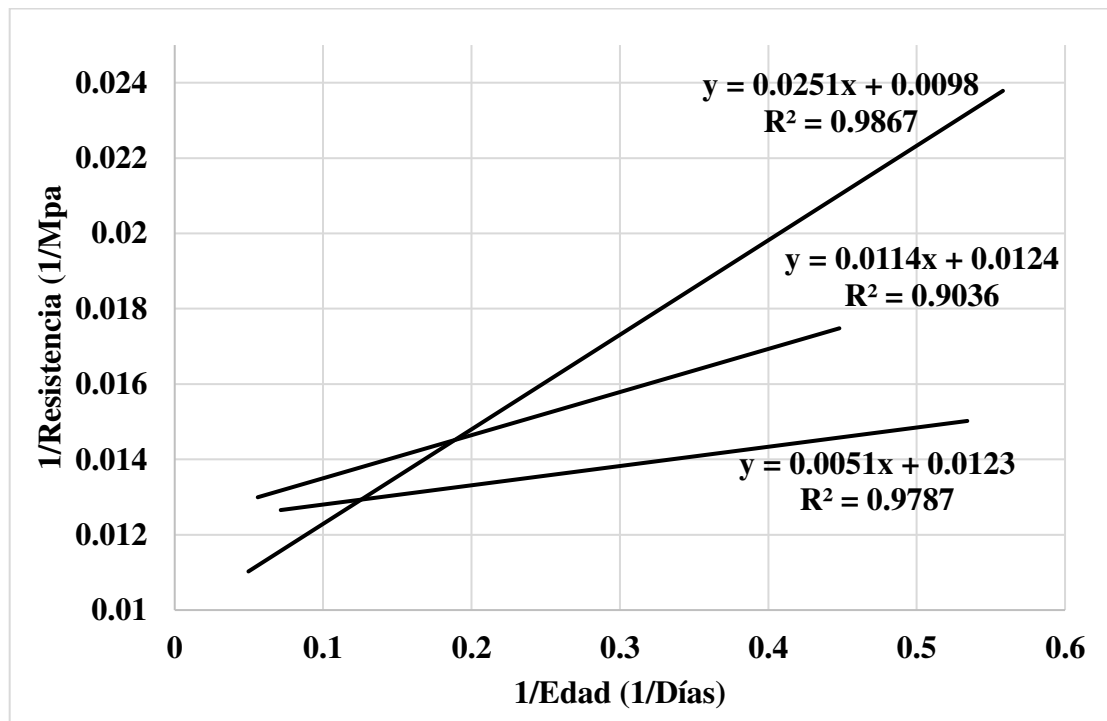
A continuación, se muestra el procedimiento No.3 descrito por la norma ASTM C1074.

MÉTODO 3 DE LA ASTM C 1074 para M1

10°C		23°C		40°C	
1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)	1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)	1/Resistencia (1/Mpa)	1/Edad (1/Días)
0.12541596	1.10007639	0.0296025	1.11196911	0.17856293	5.23636364
0.05812782	0.78774617	0.02544965	0.84358524	0.01769685	1.08679245
0.02414351	0.55813953	0.01724047	0.44792833	0.01503297	0.53412463
0.01510422	0.25034771	0.01503172	0.19755796	0.01346859	0.24948025
0.01302164	0.12413793	0.01425824	0.11202738	0.01314067	0.12433086
0.01149425	0.04966545	0.01219512	0.05592885	0.01252333	0.07142857

Anexo 2. 40. Tabla de inverso de la resistencia e inverso de la edad

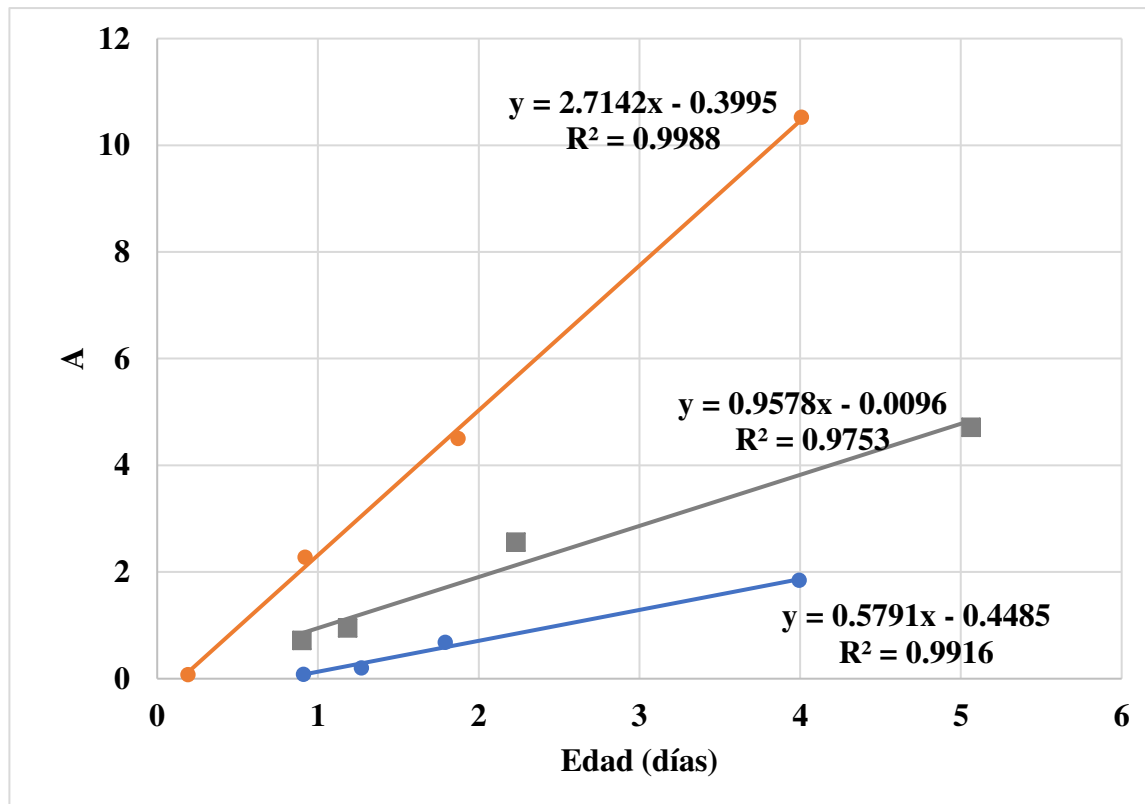
Se trazan las pendientes de mejor ajuste de los últimos 4 datos de resistencia obtenidos a partir de los cubos de mortero equivalente



Anexo 2. 41. Inverso de la resistencia vs inverso de la edad a las ultimas 4 edades

						$A = \frac{S}{Su - S}$				
						$Su = \frac{1}{b}$	A			
Temperatura (°K)	Temperatura (°C)	Pendiente	Intercepto con el eje vertical	intercepto/ pendiente	Ln(k)	Su	10°C	23°C	40°C	1/Temp
283	10	0.0251	0.0098	0.39043825	-0.94048546	102.040816	0.08476338	0.72082556	0.07397921	0.00353357
296	23	0.0114	0.0124	1.0877193	0.08408312	80.6451613	0.20278176	0.95021684	2.2791075	0.00337838
313	40	0.0051	0.0123	2.41176471	0.88035872	81.300813	0.68323588	2.5617359	4.5006027	0.00319489
							1.84758582	4.71173948	10.5255241	
							3.04192751	6.672993	14.6311254	
							5.78426052	60.5238095	55.0754686	

Anexo 2. 42. 15. Anexo 2. 6. Valores de b, K, Su y A.



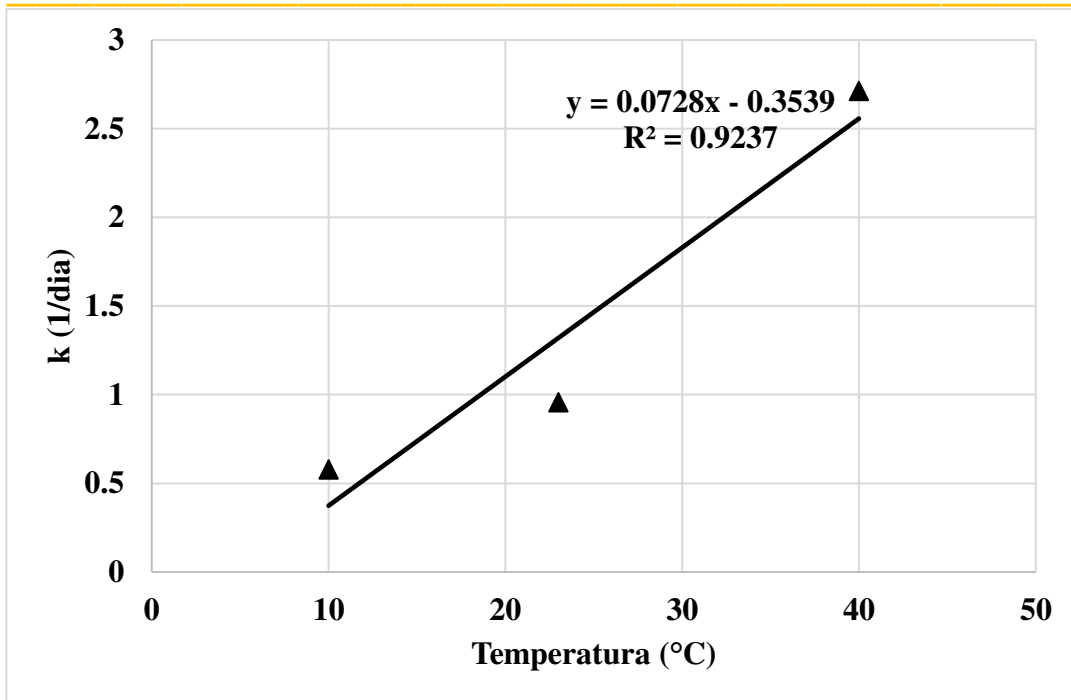
Anexo 2. 43. . A vs la edad real de las primeras 4 edades de ensayo.

Se tomó el valor de las 3 pendientes y se graficaron con su respectiva temperatura

Temperatura	Pendiente de A VS edad
10	0.5791
23	0.9578
40	2.7142

Graficando estos valores y aplicando el procedimiento del Apéndice A1.2.1 de la ASTM C1074 encontramos el valor de T0 en el intercepto con la temperatura.

Cuando la pendiente de k es igual a cero.

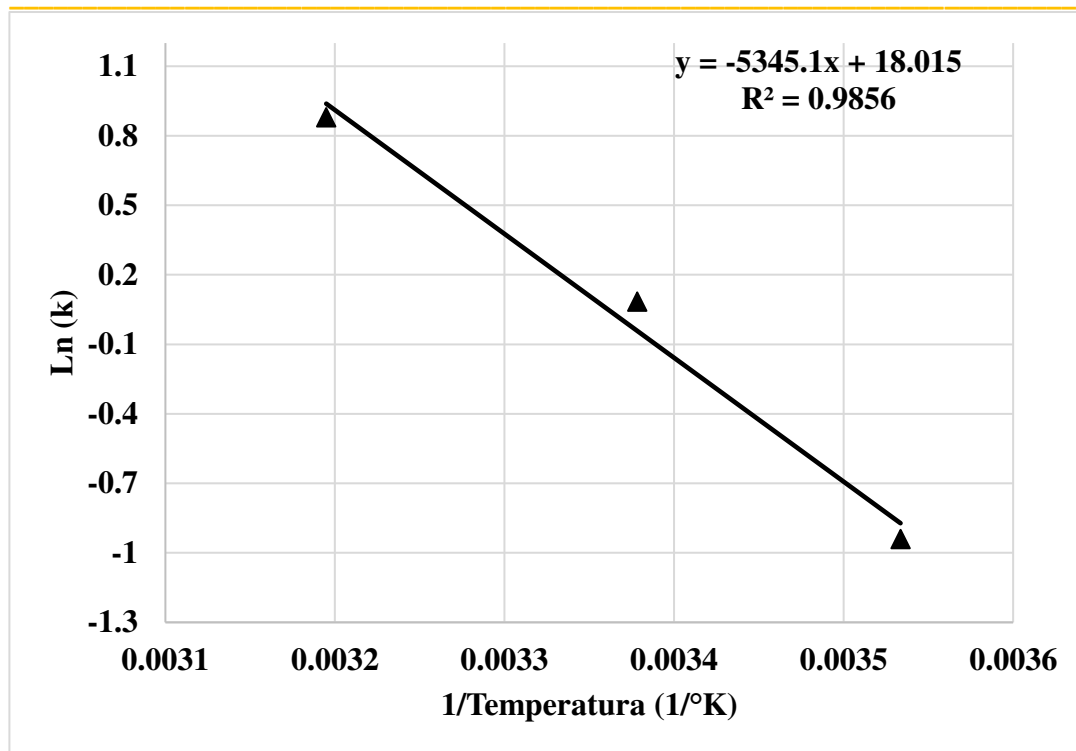


Anexo 2. 44. Pendiente de k vs la temperatura de curado

El valor encontrado para T_0 de acuerdo a la intercepción con el eje de las X es:

$$T_0 \text{ (Método 3)} = 4.86 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para encontrar el valor de E_a se grafica el $\ln(K)$ con el inverso de las temperaturas en grados Kelvin.



Anexo 2. 45. Logaritmo natural de K vs el inverso de la temperatura en grados Kelvin

$$Q(K) = 5345^{\circ}\text{K}$$

$$E_a = 44438.33 \text{ J/mol}$$

El valor de $Q(K)$ es la pendiente de la recta y se multiplica por la constante universal de los gases para poder encontrar la energía de activación.